

UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Modelo de desarrollo y expansión urbana basado en las características geológicas y geomorfológicas del oriente antioqueño**

**Una aproximación al concepto de Geología  
Urbana moderno**

**Nicolás Moreno Quimbay**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Minas, Área curricular de Medio Ambiente  
Medellín, Colombia

2017

# **Modelo de desarrollo y expansión urbana basado en las características geológicas y geomorfológicas del oriente antioqueño**

## **Una aproximación al concepto de Geología Urbana moderno**

**Nicolás Moreno Quimbay**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Medio Ambiente y Desarrollo**

Director:  
Magister José Humberto Caballero Acosta

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Minas, Área curricular de Medio Ambiente  
Medellín, Colombia  
2017

*A mi madre, que me inculcó el espíritu investigativo; a mi padre, que me enseñó la virtud de la perseverancia; a mis hermanos que me dieron esperanzas en cada etapa; y por supuesto a mi ahijada, Candelaria, que representa el porvenir de un futuro prometedor.*

## **Agradecimientos**

Agradezco enormemente a mi asesor Humberto Caballero por todos los comentarios y correcciones, los cuales surgieron siempre de enriquecedoras discusiones. A Patricia, por ayudarme a sortear las enmarañas legales de la universidad. Y finalmente, a Meli, por no dejarme desfallecer en los momentos más turbios del proceso investigativo y ser un apoyo durante un largo tiempo.



## Resumen

El enfoque principal de este escrito se centra en definir y delimitar el concepto moderno de geología urbana, el cual es ampliamente disperso y variable en la literatura actual, y escasamente presente en el ámbito regional latinoamericano.

Se puede apreciar que el título no describe o representa en su totalidad la idea o intención principal consignada en el cuerpo del trabajo. Esta incongruencia se debe fundamentalmente a una barrera conceptual, la cual surgió durante el desarrollo de la actividad investigativa: El concepto central, sobre el cual se esperaba fundamentar el estudio, el concepto de geología urbana, estaba socavado, difusamente definido y presto a diferentes interpretaciones. Es por este fundamental motivo, que el estudio se enfoca principalmente en la búsqueda de una definición y una teorización incipiente de qué es la geología urbana moderna y cuáles son sus principales puntos de interés.

Para llevar a cabo este nuevo objetivo central, se documentan una serie de casos históricos, distribuidos a lo largo del tiempo y reportados en 5 continentes, donde se discute y se vislumbra el concepto de geología urbana de manera intrínseca en el hombre. Así mismo, se expone una evolución del concepto, desde el aprovechamiento de una o dos características geológico/geomorfológicas que condicionan o dictaminan el desarrollo particular de una ciudad, hasta una sumatoria de efectos y fenómenos que trascienden de una escala puntual, hasta un alcance planetario, para dar una identidad propia a ciertas urbes más complejas.

Una vez consolidado esto, se exponen las diferentes interpretaciones modernas que se han presentado a lo largo del siglo XX, y específicamente desde el momento en que se expone el término por parte de R. F. Legget en su obra *Urban Geology*.

Posteriormente, consignado y apoyado en lo anterior, se propone una definición concreta de lo que se entiende por geología urbana, se delimitan sus alcances y se expone una base conceptual de esta disciplina de estudio. Proponiendo como punto de partida el mapa geológico-urbano y como éste, así como el estudio del mismo

nombre, debe ser concebido bajo el concepto de los Indicadores Geológico-Urbanos (I. G. U.) y su análisis a través de una matriz cruzada, en la cual se puede evaluar de manera cualitativa qué tanta incidencia tiene un factor geológico/geomorfológico sobre un aspecto urbano.

Finalmente, se expone mediante un caso de estudio real, como aplicar esta metodología de los I. G. U. y como estos dan un indicio fundamental de como conducir o enfocar estudios de planificación urbana con una base geológica en mente.

**Palabras clave:** Geología, Geomorfología, Urbanismo, Desarrollo, Indicadores Geológico-Urbanos, Geomedicina, Resiliencia.

## Contenido

Resumen .....	IV
1. Introducción .....	1
2. Objetivos .....	7
2.1 Objetivo Principal .....	7
2.2 Objetivos específicos .....	7
3. Metodología .....	8
4. Alcance .....	11
5. El concepto de geología urbana a través del tiempo .....	12
5.1 Petra y las ciudades cavadas en roca .....	13
5.1.1 Geología y geomorfología .....	14
5.1.2 Nociones de geología urbana en Petra .....	16
5.1.3 Desarrollos similares a Petra alrededor del mundo .....	19
5.2 Venecia y la relación de las ciudades con su entorno .....	41
5.3 La cuenca de México y la evolución del entorno .....	45
5.4 Las ciudades modernas y la geología como motor de desarrollo .....	59
5.4.1 La geología de Nueva York y los grandes rascacielos de Manhattan ...	59
6. Geología urbana, una aproximación moderna .....	68
6.1 El nacimiento de una nueva rama de la geología .....	68
6.2 Aproximaciones de la Geología Urbana en Colombia .....	78
7. El concepto unificado de geología urbana .....	80
7.1 Geología urbana .....	81
7.2 Justificación de los I. G. U. propuestos para el estudio .....	87
7.2.1 Marco Tectónico .....	87
7.2.2 Cambio Climático .....	88
7.2.3 Geología Regional .....	89
7.2.4 Geomorfología .....	90
7.2.5 Hidrogeología .....	91
7.2.6 Geología Ambiental .....	93
7.2.7 Geotecnia .....	95

7.2.8 Geología Económica.....	95
7.2.9 Geomedicina.....	96
7.2.10 Indicadores Urbanos.....	100
7.3 Análisis posterior .....	101
7.4 Demostración – Caso de estudio .....	105
7.4.1 Cambio climático – Política.....	110
7.4.2 Cambio climático – Ambiente .....	111
7.4.3 Geotecnia – Uso de la tierra .....	112
7.4.4 Geomorfología – Uso de la tierra.....	112
7.4.5 Geotecnia – Economía .....	114
7.4.6 Geotecnia – Política.....	114
7.4.7 Geología económica – Política .....	115
7.5 Representación gráfica de la influencia de los indicadores geológicos- geomorfológicos sobre los indicadores urbanos .....	115
8. Discusión y recomendaciones posteriores.....	121
9. Conclusiones .....	127
9.1 Conclusiones referentes al Capítulo 5: El concepto de geología urbana a través del tiempo .....	127
9.2 Conclusiones referentes al Capítulo 6: Geología urbana, una aproximación moderna .....	129
9.3 Conclusiones referentes al Capítulo 7: El concepto unificado de geología urbana .....	130
10. Bibliografía .....	134
10.1 Recursos electrónicos (en orden de citación) y Software.....	142

## Índice de Figuras

<b>FIGURA</b>	<b>PÁGINA</b>
Figura 1. Metodología.	8
Figura 2. Localización Petra.	13
Figura 3. Vista típica de Petra.	14
Figura 4. Columna generalizada en las cercanías de Petra.	15
Figura 5. Localización Capadocia.	20
Figura 6. Columna generalizada en la región de Capadocia.	21
Figura 7. Tipos de asentamientos en Capadocia.	22
Figura 8. Castillo de Uchicar, Capadocia.	24
Figura 9. Localización Castillo de Montezuma.	25
Figura 10. Columna generalizada de la Formación Verde.	27
Figura 11. Vista general del Castillo de Montezuma.	28
Figura 12. Vista del Pozo de Montezuma.	28
Figura 13. Construcciones excavadas en roca alrededor del mundo.	31
Figura 14. Localización actual de Grecia.	32
Figura 15. Localización de antiguos asentamientos de la civilización egipcia.	33
Figura 16. Canteras del antiguo Egipto.	35
Figura 17. Localización actual de algunas ruinas del antiguo imperio romano.	36
Figura 18. Elementos arquitectónicos en la antigua Grecia.	38
Figura 19. Elementos constructivos en el antiguo Egipto.	39
Figura 20. Materiales constructivos en la civilización romana.	40
Figura 21. Localización de la ciudad de Venecia, Italia.	42
Figura 22. Aspecto actual de la laguna veneciana.	42
Figura 23. Columna generalizada del substrato veneciano.	44
Figura 24. Localización de Tenochtitlan y la actual Ciudad de México.	46
Figura 25. Columna generalizada del valle del centro de México.	47
Figura 26. Concepción artística de Tenochtitlan y el lago Texcoco.	48
Figura 27. Estructura de las chinampas.	52
Figura 28. Antiguo mapa de la bahía de Cartagena.	55
Figura 29. Hundimiento en la Ciudad de México.	56
Figura 30. Panorámica de Manhattan.	60
Figura 31. Localización de Nueva York y Manhattan.	61
Figura 32. Columna generalizada del subsuelo en Manhattan.	62
Figura 33. Esquisto de Manhattan.	64
Figura 34. Distribución de los grandes edificios en Manhattan.	66
Figura 35. Principales problemas geológicos en California entre 1970 y 2000.	71
Figura 36. Terremotos con magnitud superior a 5.5 registrados en California.	74
Figura 37. Intensidad de sequía en California a comienzos del año 2017.	74
Figura 38. Cursos de campo en geología urbana.	76
Figura 39. Interface del Software LithoFrame Viewer.	78
Figura 40. Indicadores Geológicos-Urbanos (I. G. U.).	84
Figura 41. Estructura de la matriz cruzada.	85
Figura 42. Influencia geomorfológica en la configuración urbana.	91
Figura 43. El río Nilo como eje de la civilización egipcia.	92
Figura 44. Porcentaje de gas Radón en hogares de Inglaterra.	98
Figura 45. Aspectos de los gráficos de áreas.	104

Figura 46. Localización del altiplano del oriente antioqueño cercano.	105
Figura 47. Matriz cruzada de I. G. U. que intervienen en el caso de estudio.	107
Figura 48. Macro-indicadores con sus respectivos pesos.	109
Figura 49. Principales geoformas en el oriente antioqueño cercano.	114
Figura 50. Gráficos de áreas para el caso de estudio.	117-119
Figura 51. Panorámica del barrio El Poblado en la ciudad de Medellín.	123
Figura 52. Modelo del rol que desempeña la geología en las ciudades.	126

## Índice de Tablas

### TABLA

Tabla 1. Generación de desperdicios sólidos presentes y proyectados a 2025.

### PÁGINA

94

## **1. Introducción**

Las ciudades son una expresión misma de la creatividad y capacidad adaptativa de los seres humanos. Fueron concebidas con la finalidad de satisfacer nuestros más profundos impulsos, dictados por millones de años de evolución, que nos llevaron a conformar estructuras sociales bien definidas para rodearnos de protección, acortar distancias y palpar el concepto de inmediatez, a través de la cercanía con otros individuos y con las cosas materiales que necesitamos día a día. Al ser creadas como una extensión de la naturaleza humana, tienen grabada gran parte de nuestra esencia, de la cual han adoptado un carácter propio, pues agrupan en un solo lugar todas las experiencias y vivencias que representan la majestuosidad de la mente humana.

Las ciudades son un antiguo invento, y aun hoy, siguen siendo una de nuestras más grandes creaciones. Siguen vigentes, y a diferencia de otros logros descubiertos o alcanzados que son rebatidos o superados, las ciudades continúan jugando un papel fundamental como motores sociales, culturales, económicos y epistemológicos del planeta.

Aunque su esencia no ha cambiado, la interpretación y aplicación del “concepto” si ha evolucionado de manera quimérica, hasta tergiversar o cambiar por completo aspectos altamente eficientes con los cuales se identificaban ciertas urbes primitivas. La técnica, ha superado a la razón y ha nublado parte de nuestro espíritu resiliente frente al ambiente natural; espíritu con el que muchas ciudades de antaño se identificaban, y que ahora se ha perdido.

Actualmente el desarrollo y crecimiento urbano presentado por las ciudades se ha convertido en un importante tema de discusión entre académicos de diferentes especialidades por el inminente riesgo, no solo en materia social, sino ambiental que promueve este rápido crecimiento desordenado y poco planeado. Las ciudades se han convertido en lugares que demandan un masivo tránsito de recursos y se han antropomorfizado a tal punto, que el entorno original en el que se asentaban se



pierde por completo, ya sea por el avance técnico de las obras de infraestructura, o por el desordenado asentamiento de las comunidades que se expanden sin tener en consideración el delicado equilibrio del entorno natural donde se encuentran.

Los modelos de desarrollo urbano actuales fallan en integrar las diferentes disciplinas del conocimiento que se requieren para entender un ente sumamente complejo como lo es una ciudad, y en este aspecto, el entorno geomorfológico y geológico del terreno, es uno de los puntos más relegados e ignorados por los planificadores. Anteriormente, los lugares de asentamiento de una población eran meticulosamente estudiados para seleccionar el lugar más adecuado para la instauración de una localidad, inclusive, en muchos casos, se aprovechaban las características geológicas para darle un verdadero potencial y una identidad a la propia ciudad y sus habitantes (Ahnert, 1998).

Los planes de desarrollo urbano deberían volver una vez más sobre la importancia del entorno geológico y geomorfológico sobre el cual se asienta una ciudad, no solo para promover planes de ordenamiento territorial o sesgar zonas de acuerdo a la prevención de desastres (algo muy común en América Latina), sino analizar a la ciudad en todas sus dimensiones: social, urbanística, económica, política, ambiental; y como estas dimensiones se ven afectadas por las características geológicas sobre las cuales se desarrollan. De lo anterior, surge la pregunta: ¿Es posible plantear un modelo de desarrollo y expansión urbana que acoja y entienda las características geológicas y geomorfológicas que dicta el terreno? El concepto de geología urbana quizás podría dar unas bases conceptuales sólidas para responder a esta pregunta.

La geología urbana es una rama de la geología ambiental que se ocupa de aplicar los conocimientos de las ciencias de la tierra al planteamiento y administración de áreas metropolitanas. Lamentablemente, dentro de los planes de desarrollo de muchas metrópolis alrededor del globo, este concepto es completamente relegado a una segunda instancia. Aún más, los mismos conceptos de la geología ambiental

son sesgados y enfocados casi exclusivamente a la atención y prevención de desastres. Es importante entonces desligar el concepto de la geología urbana de este último, y entenderlo como algo más expansivo, más incluyente y universal, que entiende a la ciudad como un ente de gran complejidad que demanda y desecha grandes cantidades de recursos. Debe estar enfocada a la planeación y manejo sostenible del entorno urbano en equilibrio con el espacio físico que ocupa y rodea.

Los estudios de geología urbana son relativamente nuevos, y se han desarrollado principalmente en Estados Unidos, Europa y el este de Asia, enfocándose en estudios de caso muy puntales y únicos que atañen a las características geológicas particulares de cada ciudad. Sin embargo, el campo de la geología urbana es relativamente joven, y aún hay muchos conceptos que deben ser tratados y unificados para darle mayor uniformidad, pues dada la dispersión de conceptos e interpretaciones que se le dan al término, la disciplina carece de identidad, y más importante aún, de una metodología establecida que sirva como herramienta universal con la cual buscar un fin metodológico: relacionar la planeación urbana de una manera sistemática con las ciencias de la tierra. Es a esta prometedora tarea a la cual apuntará el fin último de este escrito, donde se tratarán de establecer las bases de una nueva rama del conocimiento.

De acuerdo a la Teoría Cuántica, grandes físicos teóricos como Yang, Mills, Weinberg, Glashow y Salam nos han mostrado que vivimos en un Universo de Super-simetrías rotas. Y sin embargo, al contemplarlo, nos parece tan lógico, tan perfecto, tan ordenado... Quizás las ciudades, aunque sean inventos nuestros, si las miramos una vez más en su esencia primordial, y quitamos de la vista todo el caos aparente y el ruido, encontraremos una lógica y un orden, que sustenta los mismos cimientos conceptuales que han mantenido a este “invento” vigente hasta el día de hoy. Partiendo todo de una relación casi simbiótica, donde el organismo de concreto busca adoptar una personalidad, dictada por una compleja “ecuación” que se desprende del medio natural.

Finalmente, es importante profundizar en la siguiente cuestión: El motivo por el cual el título de la tesis de maestría no corresponde conceptualmente en su totalidad con el cuerpo del trabajo presentado, se debe, en primera instancia, a una barrera conceptual que se presentó durante el desarrollo del proceso investigativo: El anhelo inicial, desde el punto de vista académico y científico, era aplicar y traer a un contexto regional el concepto de Geología Urbana, término ampliamente utilizado en la literatura en países desarrollados, y tímidamente ejemplificado en algunos casos puntuales en América Latina.

Por supuesto, una manera adecuada de hacer esto era seleccionar y aplicar un caso piloto que reflejara las complicadas relaciones que se desarrollan entre el entorno natural (principalmente en su dimensión geológica) y el desarrollo urbano (con todas sus posibles variables). Por esta razón se discutió y se seleccionó la región del Oriente Antioqueño cercano. Dicha región fue seleccionada, sobre otros posibles casos de estudio, como la ciudad de Medellín, pues presentaba prometedores aspectos a tener en cuenta en el desarrollo y planificación urbana de una ciudad con potencial de expansión y crecimiento a mediano y largo plazo. Y, desde el aspecto investigativo, la presencia de datos e información no suponían una coyuntura para el desarrollo y la proposición de unos objetivos de investigación basados en la primicia de que la región era prometedora para aplicar los novedosos conceptos que atañen a la disciplina de la Geología Urbana.

Sin embargo, conforme se desarrolló el proceso investigativo, el devenir científico expuso su intrincada forma de operar y demostró nuevamente que difícilmente el libre desarrollo de la ciencia conduce siempre por un camino trazado y preestablecido del punto A al punto B. La base conceptual sobre la cual se esperaba edificar el proyecto estaba incompleta, socavada, y en muchos casos mal interpretada: El concepto de Geología Urbana no estaba claramente definido y delimitado en la literatura. Incluso se prestaba a interpretaciones erróneas y tergiversaciones en cuanto a su interés principal de estudio y, por consiguiente, su forma de operar, dentro de un marco científico que pudiera relacionarlo y

contrastarlo con otras disciplinas ampliamente difundidas y establecidas dentro de las ciencias ambientales y de la tierra.

De esta forma el proceso investigativo y el mismo desarrollo del proceso científico cambió de rumbo. La investigación se enfocó en proveer una definición concreta de la disciplina, donde se clarificarán cuáles eran sus áreas de interés, el proceso o el mecanismo por el cual debía llevarse a cabo y su relación con disciplinas afines, que pudieran englobarse en un marco común contemplado dentro de la Geología Ambiental.

Este aspecto dotó al proyecto de un carácter filosófico, sin alejarse nunca de los terrenos o marcos conceptuales dictaminados por el método científico.

La ardua y fuera de lo común tarea, de definir y delimitar una nueva rama del conocimiento geológico, consumió gran parte del tiempo y los recursos empleados en el proyecto. Sin embargo, dada su vital importancia, no solo para el desarrollo y consecución de los objetivos inicialmente propuestos, sino por su real contribución a la ciencia, como un marco de referencia estandarizado que daría cohesión y exactitud a la naciente disciplina, el cambio de rumbo en la investigación pareció verdaderamente prometedor, al punto de modificar ciertos objetivos y conjeturas propuestas inicialmente, pues el desarrollo que había tomado la investigación justificaba en gran medida el cambio, ya que suponía un avance en un campo mucho más amplio, el cual necesitaba una aproximación y una disertación, para evitar seguir cayendo en la mala interpretación, la aleatoriedad y la falta de cohesión y aplicación por parte de la comunidad científica.

Dados los procesos y políticas que tiene la Universidad, el título y los objetivos propuestos en el anteproyecto quedaron consignados y fueron copiosamente utilizados dentro de la investigación final, sabiendo ampliamente que no correspondían en su totalidad a lo presentado en el manuscrito entregado para su evaluación. De esta forma, y apegándose a los protocolos y directrices dictaminados por la Universidad, se conservaron el título y los objetivos expresados en el

anteproyecto, lo que ameritó incluir un subtítulo, para acompañar el título principal, de forma que expusiera y representara de forma más idónea el contenido y nuevo carácter adoptado en la investigación.

Es por esta fundamental razón, donde el proceso científico inicia en un punto y conduce a otro, en muchos casos inesperado, que el título de la tesis puede presentar ligeras diferencias con respecto al contenido de esta. Después de todo, si no fuera por estos vaivenes de la ciencia, muchos de los grandes avances que se han producido no hubieran sido concretados, pues es esta naturaleza camaleónica, en ciertos casos imprevista, la que impulsa a los investigadores a lanzarse al enriquecedor y gratificante proceso de la investigación.

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo Principal**

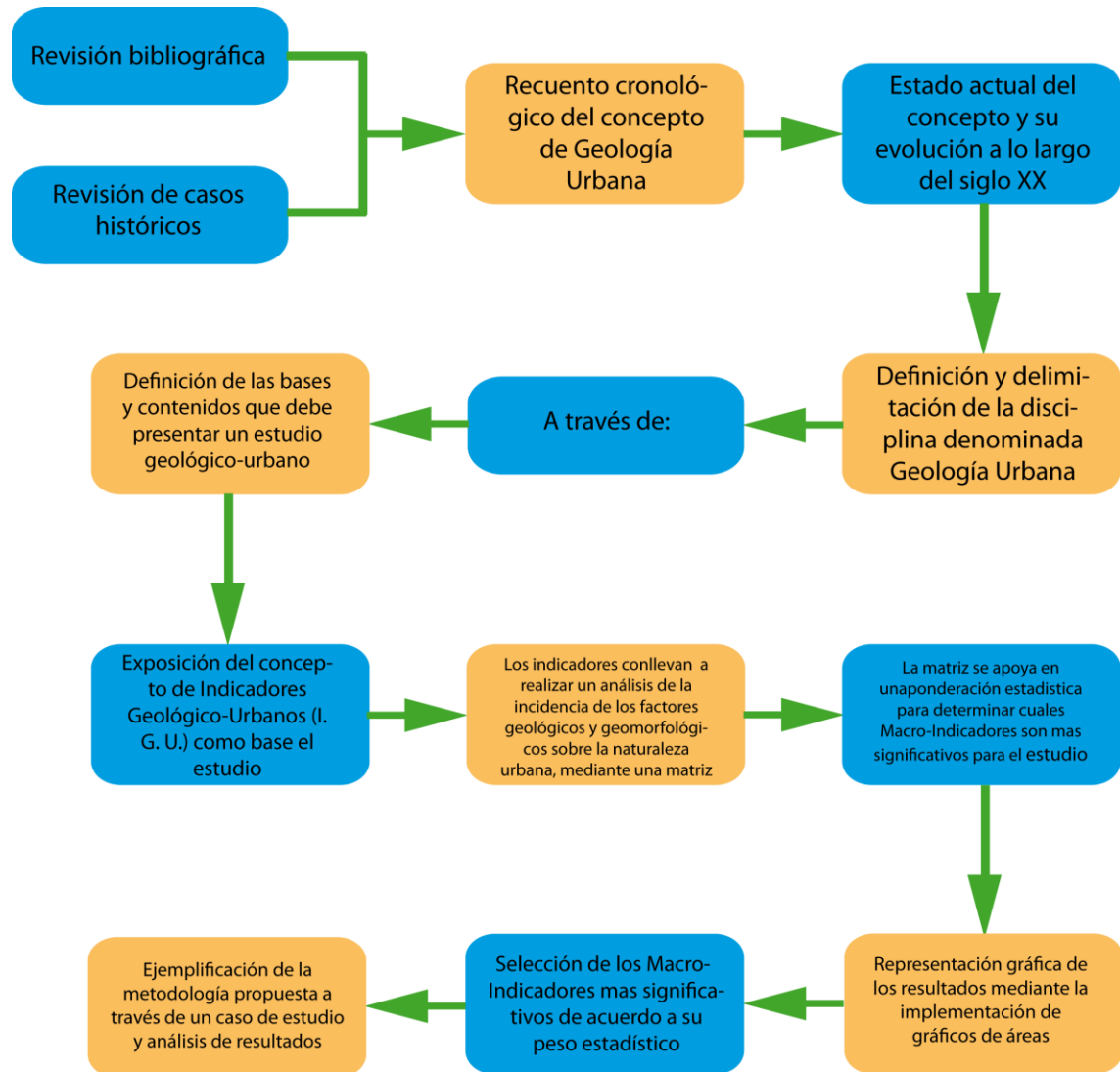
- Delimitar y definir el concepto de Geología Urbana en nuestro medio, a través de una recopilación histórica y la proposición de una metodología que exponga las bases fundamentales que conforman un estudio geológico-urbano.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Hacer un recuento de casos históricos donde se evidencie la aparición del concepto y su evolución a lo largo del tiempo.
- Exponer el estado actual de la geología urbana.
- Justificar conceptualmente por qué esta disciplina no debe ser tratada solo como una herramienta para la atención y prevención de desastres.
- Proponer un modelo de análisis cualitativo que busque relacionar la incidencia o importancia de factores geológico-geomorfológicos sobre los factores que intervienen en el proceso de expansión y desarrollo urbano.
- Ejemplificar, mediante un caso real, las metodologías propuestas que conforman la base del estudio geológico-urbano.

### 3. Metodología

La metodología a desarrollar se basa en una sucesión de actividades, las cuales siguen un orden lógico para llevar a cabo la consecución de cada uno de los objetivos propuestos (Fig. 1).



**Figura 1.** Metodología utilizada en el estudio.

En primera instancia se realizará una revisión intensiva de la literatura disponible, así como la verificación de ciertos casos históricos relevantes a través de un periodo de tiempo considerable y distribuidos en diferentes localizaciones alrededor del

planeta. El repaso de dichos casos se hará en orden cronológico, hasta llegar a la aparición, de manera conceptual, del concepto de geología urbana. La revisión abordará la manera en que diferentes civilizaciones y pueblos alrededor del mundo han entendido el entorno que habitan, para potencializarlo y materializarlo de forma resiliente en sus ciudades.

Una vez consignado esto, se expondrá la concepción y evolución del concepto desde el comienzo del siglo XX, hasta el estado actual que presenta y su significancia con respecto a otras disciplinas dentro del marco de las Ciencias de la Tierra.

Con bases en estas dos premisas metodológicas, se definirá y acotará la geología urbana, enmarcándola como una rama del conocimiento de la geología ambiental. Se delimitarán las cuestiones que busca estudiar, así como sus alcances y relaciones con otras disciplinas, no solo de las ciencias de la tierra, sino también, con aquellas relacionadas con el urbanismo, la política y el desarrollo. Para sustentar lo anterior, se procederá a exponer las bases fundamentales que debe llevar un estudio geológico-urbano, a través de la introducción y explicación de los indicadores geológico/geomorfológico-urbanos denominados I. G. U.

Para analizar la relación que tienen los aspectos geológicos y geomorfológicos con las cuestiones urbanas a través de los I. G. U., se propone elaborar un matriz cruzada, donde se evalúe de manera cualitativa a través de una escala de valor, que tanta incidencia o importancia tiene un aspecto geológico/geomorfológico en la aplicación o naturaleza de un aspecto urbano.

Dada la gran cantidad de variables que intervienen en el estudio, la cantidad de cruces entre aspectos es directamente proporcional a estas. Para facilitar el trabajo y concentrarse exclusivamente en los cruces de indicadores que realmente tiene peso e importancia, se propone tratar los temas a grandes escalas a partir de macro-indicadores geológico-urbanos, los cuales corresponden al cruce de un macro-



indicador geológico/geomorfológico con un macro indicador urbano, consignados a manera de porcentaje.

Con la obtención de esta información es posible observar a manera más general cuales macro-indicadores geológicos-urbanos están incidiendo de manera más directa con los macro-indicadores urbanos presentes en la matriz. Dicha información también puede visualizarse de manera visual, si se emplean gráficos de áreas, facilitando de esta manera su lectura e interpretación.

Estos procedimientos finales se explicarán con mayor detalle en el capítulo 3, donde se abordan desde un punto de vista estadístico, con su respectiva representación gráfica.

#### **4. Alcance**

El alcance de este trabajo apunta a la delimitación y definición clara del concepto de Geología Urbana y su evolución a través del tiempo. Sumado a la proposición de una metodología sistematizada que estructure y proponga la forma como debe plantearse y conducirse un estudio geológico-urbano. Dicha metodología ayudará a cimentar las bases teóricas de la disciplina y la dotarán de un procedimiento que puede llegar a ser sistematizado en el futuro, conforme se aplique en diferentes casos reales.

La ejemplificación de esta metodología se expondrá mediante un estudio de caso para la subregión del oriente cercano a la ciudad de Medellín en Antioquia. Donde se determinarán cuáles serán los factores geológicos y geomorfológicos que más impactarán la naturaleza urbana, en el caso hipotético del desarrollo de una urbe con epicentro en la ciudad de Rionegro.

La definición exacta de la geología urbana ayudará a que sea ampliamente incluida en los estudios de planificación urbana, a la vez que proporcionará una herramienta complementaria de análisis para la geología ambiental en ecosistemas dominados por la influencia antrópica.

## **5. El concepto de geología urbana a través del tiempo**

Aunque el término geología urbana haya sido acuñado por primera vez hace 5 décadas en los escritos de R. F. Legget (1973), el concepto como tal, de un equilibrio o armonía entre asentamiento humano y el entorno, parece existir desde el momento mismo en que la humanidad, ya estructurada como sociedad, decide establecer un emplazamiento permanente.

A lo largo de la historia se han fundado y desaparecido infinidad de ciudades y emplazamientos. Algunas de estas urbes han presentado un perfecto equilibrio entre el entorno natural donde se asientan y el desarrollo urbano o finalidad con la que se concibieron. Son estas urbes esparcidas alrededor del mundo en los cinco continentes y distribuidas a lo largo del tiempo, las que tienen los indicios primordiales de que el concepto de geología urbana es intrínseco al hombre al momento de planificar un asentamiento, ya sea por el simple instinto de aprovechar las características propias que impone la naturaleza, o por el contrario, por el hecho de antropomorfizar el entorno y hacerlo más acorde a las necesidades propias del hombre como especie.

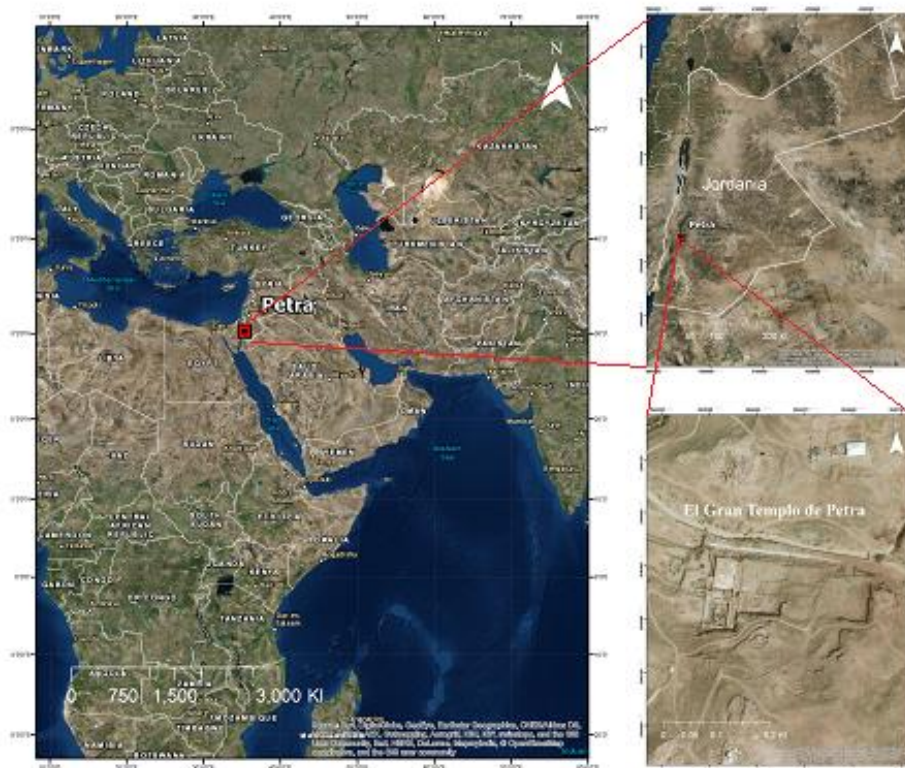
En este capítulo se analizarán ejemplos puntuales de asentamientos humanos que se han desarrollado bajo parámetros de planificación basados en características geológicas y geomorfológicas específicas impuestas por el entorno. Y se analizará como dichas características dan pie a un desarrollo particular que busca explotar y aprovechar de la manera más eficiente estas imposiciones físicas dictadas por el terreno.

Los casos expuestos a continuación buscan ejemplificar el concepto de geología urbana a través del tiempo, y como dicho concepto, sin importar la época o el lugar donde se desarrolló, siempre han conservado una base conceptual que se puede rastrear a través de la historia de la humanidad.

### 5.1 Petra y las ciudades cavadas en roca

La antigua ciudad de Petra fue construida por los Nabateos en el siglo IV a. C. Su nombre significa ciudad cortada en la roca, y a lo largo de su historia fue conquistada y ocupada por diferentes pueblos, de los cuales, destaca el Imperio Romano. Su historia antigua se puede rastrear hasta el siglo VI, momento en que es evacuada y parcialmente destruida por un terremoto.

El emplazamiento está localizado en una zona desértica y montañosa al sur de la actual Jordania, entre el Mar Muerto y el Mar Rojo (Fig. 2), enclavado en un valle de paredes abruptas esculpidas sobre rocas sedimentarias detríticas. Debido a esta localización específica en la mitad del desierto jordano, la ciudad fue un centro religioso y de intercambio, así como un importante reservorio de agua.



**Figura 2.** Localización de Petra en la actual Jordania (Global Mapper 18.2).

A grandes rasgos, la ciudad se caracteriza por estar excavada y esculpida dentro de las rocas que conforman las paredes de los cañones circundantes, de tal forma que se aprovecharon los rasgos morfológicos del terreno para constituir edificaciones y elementos urbanísticos que cumplen una función propia a la población, más allá de proveer protección (Fig. 3).

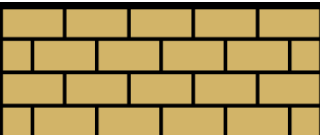


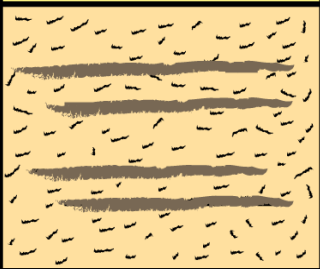




**Figura 3.** Vista típica de una de las construcciones más reconocibles: el Tesoro de Petra. La fachada exterior está completamente esculpida en las areniscas que conforman los acantilados circundantes (URL: <http://www.nationalgeographic.com/archaeology-and-history/archaeology/lost-city-petra/> [24.05.2016]. Crédito de la fotografía: Jon Arnold Images LTD.).

### 5.1.1 Geología y geomorfología

En la zona donde se localiza Petra se registran rocas con edades desde el Precámbrico hasta el Cretácico Superior (Dumon, 2010). Hacia el sur de la ciudad se presenta una cadena montañosa caracterizada por rocas ígneas Precámbricas correspondientes al Complejo granítico de Aqaba, el cual está cortado por una serie de diques. El Complejo está suprayacido a manera de inconformidad por areniscas

cuarzosas que varían en edad desde el Cámbrico al Ordovícico. Fueron estas areniscas las utilizadas por los nabateos para erigir la ciudad, ya que es sobre estos materiales donde se labraron la mayoría de los monumentos y construcciones. Finalmente, la secuencia se encuentra coronada por areniscas y limolitas del Cretácico Inferior y Superior respectivamente (Fig. 4).

MESOZOICO	Cretácico Superior		Calizas del Cretácico Superior.
	Cretácico Inferior		Arenisca Kurnub: Blanda. Ocupa el valle central.
PALEOZOICO	Ordovícico Inferior		Arenisca Disi: Caracterizada por domos de color blanco.
	Cámbrico Superior		Arenisca Umm Ishrine: Blanca rojiza. Dura. La mayoría de los monumentos están cavados sobre esta unidad.
	Precámbrico Inferior a Medio		Arenisca Salib.
PRECÁMBRICO			Basamento: Complejo granítico.

**Figura 4.** Columna estratigráfica generalizada de la zona donde se localiza Petra (Modificado de Dumon, 2010).

En cuanto a los cuerpos de areniscas, son dos las formaciones principales sobre las cuales están excavados los rasgos urbanísticos: la Formación Umm Ishrin, del Cámbrico Superior y la Formación Disi, del Ordovícico Inferior (Abed et al., 2012).

La Formación Umm Ishrin está caracterizada por cuarzoareniscas de grano medio-fino cementadas por óxidos de hierro, y presenta un espesor de 350 m, a lo largo de los cuales se manifiestan facies o ambientes que caracterizan un depósito fluvial influenciado por la tectónica local (Makhlouf y Abed, 1991). De igual manera, la Formación Disi está compuesta por cuarzoareniscas con poca presencia de cemento. Descansa concordantemente sobre la formación mencionada anteriormente y presenta unos 300 m de espesor, dentro de los cuales se encuentran facies asociadas a ríos trenzados (Abed et al., 2012).

La geomorfología de la zona está compuesta a grandes rasgos por cañones estrechos de pendientes verticales excavados sobre las areniscas, que desembocan o se desprenden de manera radial de valles de extensión media y relieve suave y colinado sobre los que discurren, o discurrieron posiblemente, las corrientes de mayor magnitud de la zona.

Finalmente, en cuanto a la situación estructural, la región está totalmente impactada por los eventos tectónicos que se desprenden del rift africano y su prolongación hacia el Golfo del Suez y el Golfo de Aqaba. Debido a esto, la zona está atravesada por fallas de rumbo, que se originan en el Golfo, y que, al alcanzar la masa continental, se derivan o transforman en fallas más pequeñas que se organizan de manera perpendicular a la falla de rumbo principal (Niemi, 2009). Son estas fallas derivadas las que forman y dan un control estructural a los acantilados y valles estrechos que se pueden apreciar en la ciudad y sus alrededores, así como el aparente debilitamiento de las areniscas en ciertos planos de estratificación.

### **5.1.2 Nociones de geología urbana en Petra**

Al interior de Petra encontramos ciertos elementos urbanísticos y de planificación que fueron concebidos a partir de la naturaleza geológica que imponía el terreno.



Los principales rasgos que se aprovecharon de esto fueron las edificaciones y el complejo sistema de acueductos que recorría la ciudad valiéndose de las escarpadas paredes de los cañones. A continuación, se revisa como estas características geológicas descritas anteriormente, fueron utilizadas para desarrollar y potenciar estos dos importantes rasgos urbanísticos.

En primera instancia, es posible que las propiedades de la arenisca hayan persuadido a los nabateos a situar la ciudad en dicho lugar, ya que la roca presenta las condiciones físicas y mecánicas indicadas para ser excavada. De igual forma, los nabateos se aprovecharon de los fenómenos geológicos que esculpieron el lugar y le dieron forma a los cañones y gargantas en la arenisca. Esto por efecto de las fallas que debilitaron la roca en planos definidos y las poderosas inundaciones, que aunque no son muy recurrentes en el desierto, si son eventos de gran magnitud que moldean y transforman el paisaje.

Los nabateos encontraron una sumatoria de características geológicas, las cuales parecían indicar que dicho lugar, aunque pareciera agreste, reunía las condiciones básicas necesarias para establecer una población:

- Recursos básicos necesarios como el agua y materiales de construcción.
- La arenisca presenta condiciones estructurales que permiten excavar en ella con facilidad, facilitado por los planos de debilidad naturales, pero a la vez es resistente y ofrece protección contra el ambiente.
- Lo anterior llevó a una decisión constructiva basada puramente en las características propias dictadas por la roca: excavar en ella, en lugar de explotar el material para utilizarlo como insumo de construcción.
- Igualmente, la arenisca además de proveer el material necesario para la construcción, presentaba la porosidad y cohesión indicada para construir directamente sobre ella (excavar) acueductos y cisternas para almacenar el agua.



Con respecto a este último ejemplo, el florecimiento y la prosperidad de Petra estuvieron ampliamente ligados al elaborado sistema que se construyó para administrar el agua, donde la geomorfología de cañones y las características físicas de la arenisca vuelven y juegan un papel fundamental al momento de planificar y construir la ciudad.

Los cañones angostos que circundan los valles amplios donde fueron erigidos la mayoría de los monumentos fueron cavados por flujos violentos (Abed et al., 2012). Lo que significaba que los mismos, aunque fueron moldeados miles de años antes de que los nabateos llegaran, aún estaban expuestos a los efectos de la erosión. De igual forma, los valles amplios donde se presentaba el desarrollo urbanístico estaban expuestos a inundaciones. Sin embargo, los nabateos aprendieron a utilizar estos cañones como instrumentos para controlar el flujo de agua que entraba a los valles y así controlar las inundaciones. Esto demuestra un gran entendimiento del entorno por parte de los nabateos, puesto que saben cómo utilizar las características geológicas para controlar las adversidades derivadas del entorno.

Para lograr esto, se construyeron una serie de canales que recorrían las paredes de los cañones, que además de controlar los flujos de agua mediante presas, servían para distribuir el recurso a lo largo de toda la población, aprovechando la gravedad. Lo anterior demuestra también un entendimiento y un aprovechamiento de la geomorfología existente, la cual fue explotada sin ser alterada en sus rasgos primordiales.

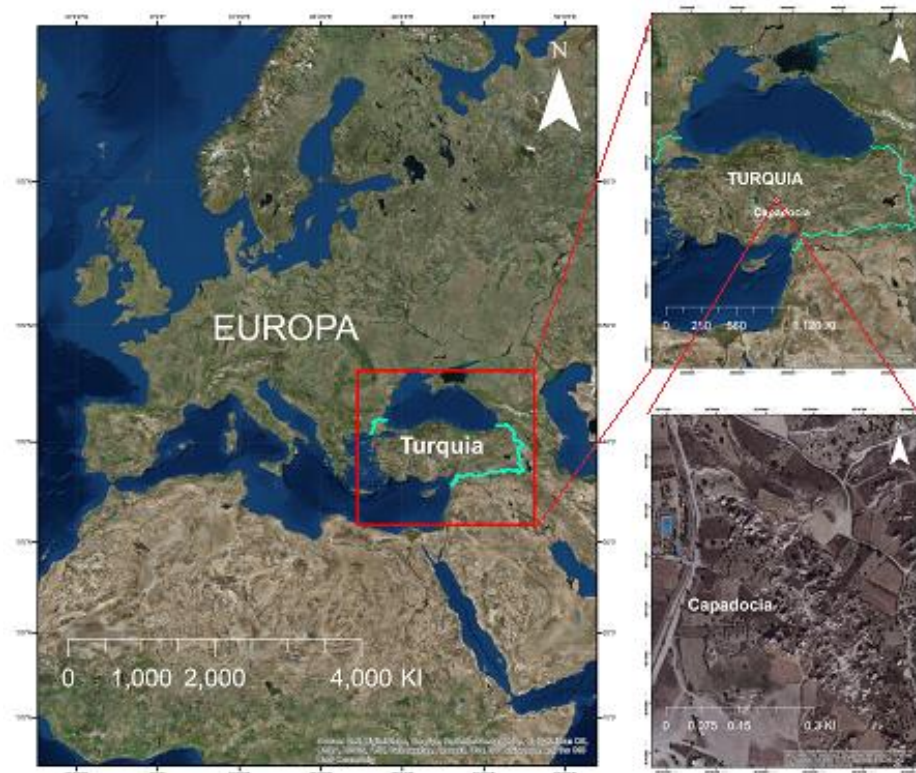
El lugar donde se asentó la ciudad de Petra era un ambiente hostil, donde diferentes eventos naturales moldearon el paisaje y lo hicieron propicio para los nabateos. Dichas fuerzas igualmente amenazaron con destruirlo, pero es este concepto el que acogen los mismos nabateos, y lo entienden de tal manera que utilizan dichas amenazas y causalidades naturales para conjugarlas a su favor, y así construir una ciudad realmente particular, que estaba en equilibrio con su agreste entorno.

Finalmente, Petra será evacuada y parcialmente destruida en el siglo VI a. C. por otro evento natural que también ayudo a moldearla, y que, sin embargo, no fue tenido en cuenta al momento de su construcción: los terremotos. Será quizá lo único que omitieron los nabateos, a la hora de entender la gran sumatoria de eventos geológicos que hacen de Petra un lugar ejemplar para el concepto de la geología urbana.

### **5.1.3 Desarrollos similares a Petra alrededor del mundo**



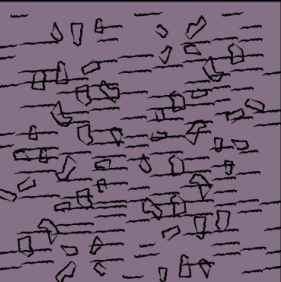


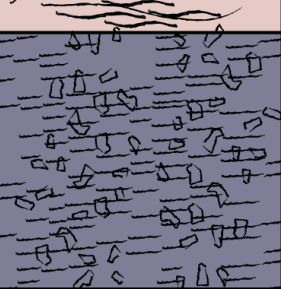



Además de Petra, se pueden encontrar desarrollos urbanos similares en otras partes del mundo. Dichos desarrollos son posteriores en el tiempo y parecen estar fundamentados sobre las mismas bases geológicas y geomorfológicas que utilizaron los nabateos para construir Petra: una roca específica sobre la cual excavar y una geomorfología de cañones o escarpes abruptos donde se lleva a cabo el desarrollo de los rasgos urbanísticos.

El ejemplo más cercano en el tiempo (posiblemente contemporáneo) serían las ciudades subterráneas de Capadocia concebidas por el imperio Hittite hacia el siglo IV a. C. en el centro de la península de Anatolia, actual Turquía (Fig. 5).



**Figura 5.** Localización de Capadocia en Turquía (Global Mapper 18.2).

La zona se encuentra en una provincia volcánica denominada Provincia Volcánica de Capadocia o CVP, por sus siglas en inglés, la cual está conformada por depósitos volcano-clásticos Neógenos-Quaternarios (Fig. 6). Dichos depósitos han sido afectados por eventos tectónicos recientes derivados de la compresión de la península, junto con procesos de erosión originados por corrientes fluviales y avenidas torrenciales que se presentan esporádicamente en la región (Bayrak, 1999 en Ayhan, 2004 y Sarikaya et al., 2015).

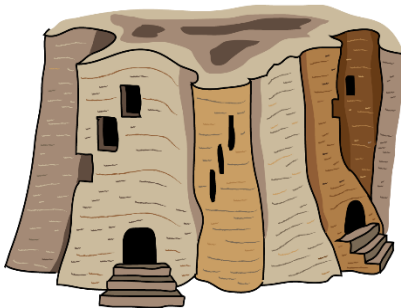
CENOZOICO	Cuaternario	Pleistoceno		Sucesión de Basaltos, Riolitas e Ignimbritas.
		Plioceno		Caliza Kisladag.
	Neógeno	Mioceno Superior		Secuencias de Ignimbritas de potentes espesores. También se reportan excavaciones en estos cuerpos.
				Depósitos eólicos.
				Lavas Topuzdag.
				Secuencias de Ignimbritas de potentes espesores. Sobre estos cuerpos se encuentra el desarrollo urbano excavado de Capadocia.
				Lavas Damasa.
				Andesita Erdas. Descanza sobre el basamento.
	MESOZOICO	Cretácico		Granito Acigol. Forma parte del basamento.

**Figura 6.** Columna generalizada de la región de Capadocia (Modificado de Sarikaya et al., 2015).

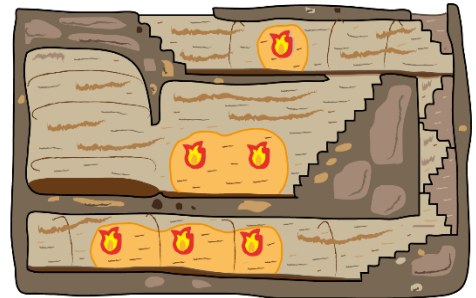
Dentro de los depósitos volcano-clásticos se destaca una unidad conformada por ignimbritas intercaladas con depósitos lacustres y fluviales del Mioceno-Plioceno (Ayhan, 2004). Es sobre esta unidad en particular donde se encuentran la mayoría de los rasgos urbanos construidos por el imperio Hittite.

El asentamiento está caracterizado por un complejo sistema de túneles y bóvedas conectadas entre sí, los cuales se desarrollaron excavando en la roca, o bien, aprovechando los rasgos morfológicos de la unidad, la cual ha sido moldeada en forma de cañones y túneles por eventos fluviales. De esta forma, los Hittites aprovecharon estas dos características naturales para crear tres tipos de asentamientos (Fig. 7 y 8):

1. Excavados en las paredes de los cañones.
2. Subterráneos.
3. De naturaleza mixta; siendo una combinación de los dos anteriores.



Asentamientos excavados en las  
paredes de acantilados



Asentamientos subterráneos

**Figura 7.** Tipos de asentamientos presentes en Capadocia: Excavados en acantilados, Subterráneos y Mixtos, que corresponderían a una combinación de los dos anteriores (No se muestra aquí).

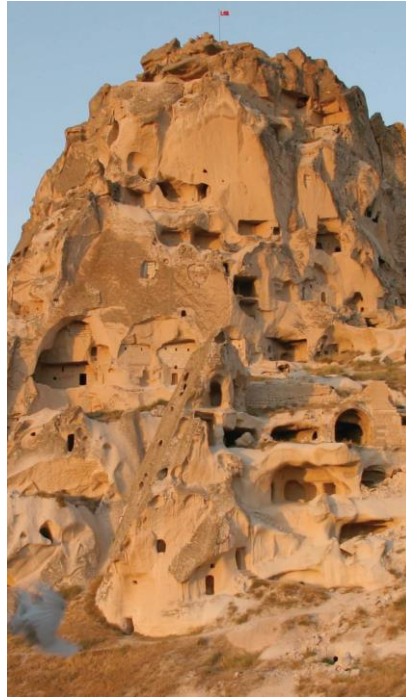
La decisión por parte de los Hittites de llevar a cabo este tipo de asentamientos aun es estudiada. Sin embargo, se podría considerar nuevamente que las condiciones mecánicas de las rocas presentes y la geomorfología predominante sentaron las

bases de una decisión constructiva, que de una u otra forma es la que le da ese carácter tan particular a la ciudad.

Como lo señala Ayhan (2004), hay una clara tendencia por parte de los Hittites de preferir las rocas piroclásticas, en este caso las ignimbritas, para desarrollar las urbes. Esto es apoyado posiblemente porque la roca presenta las características indicadas para cavar sobre ella, además de ser estructuralmente adecuada para soportar su peso, una vez es intervenida por el proceso de excavación. Igualmente menciona que otros tipos de rocas son excluidas para llevar a cabo la localización del asentamiento, siendo las andesitas, los basaltos y algunas rocas clásticas poco consolidadas donde se presentan pocas o nulas actividades de desarrollo urbanístico.

Esto indica un entendimiento y un conocimiento por parte de los pobladores de las características de las diferentes rocas presentes en la región, y como este conocimiento lleva a una decisión constructiva delimitada sobre ciertos cuerpos en particular que cumplen las características necesarias que buscaban los Hittites para concebir sus ciudades.

Igualmente, Ayhan (2004) señala en su trabajo que la geomorfología también induce un control sobre la localización de las ciudades, siendo los escarpes los sitios donde mayor número de asentamientos se reportan. Este fenómeno puede ser apoyado por los efectos de la erosión, la cual expuso en dichos lugares la roca, facilitando de esta forma el trabajo sobre ella.



**Figura 8.** Castillo de Uçhicar, Capadocia. Tomado de Gülyaz, 2012.

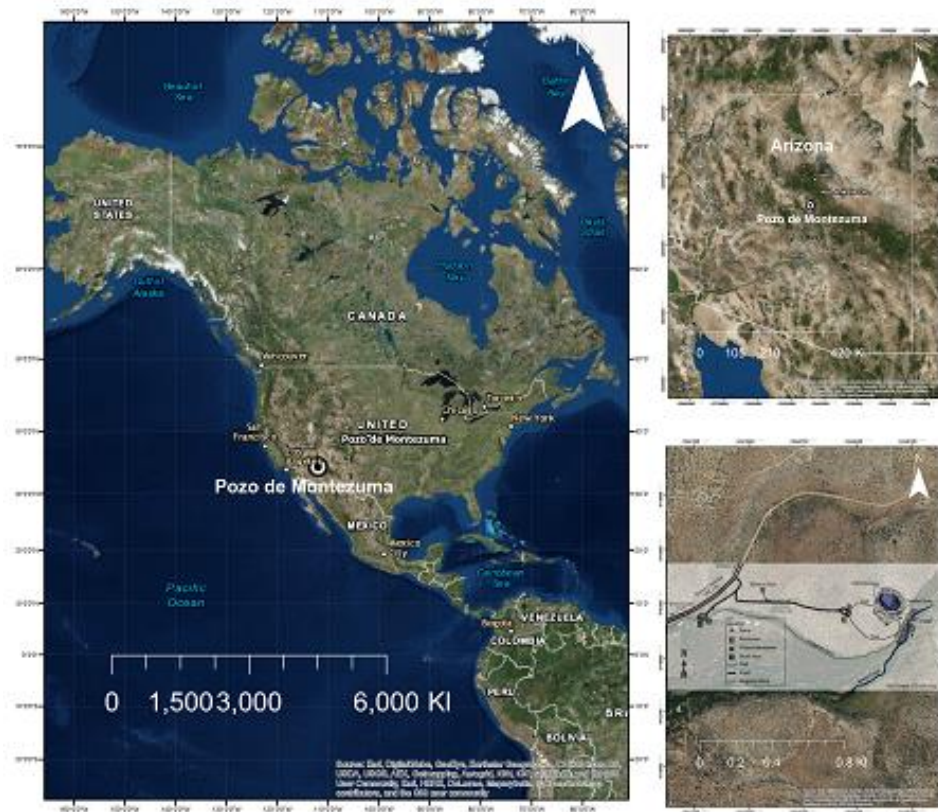
Como puede apreciarse de acuerdo con lo anterior, una región volcánica compleja tectónicamente puede tornarse en un lugar propicio para el desarrollo de una civilización si sus pobladores entienden y aprovechan los rasgos geológicos y geomorfológicos dictados por el entorno, y los potencializan de tal forma que pasan a ser la base fundamental de su sistema de desarrollo urbano. Este caso de Capadocia podría parecer único, e inclusive aislado, sin embargo, Stea y Turan (1993) han investigado regiones volcánicas con características similares a Capadocia en México, específicamente, la provincia de Pajarito en el norte. De lo anterior concluyen: “En las dos regiones la erosión y otros procesos naturales gradualmente han perforado las formaciones antiguas dejadas por cuerpos volcánicos. En ambos casos los pobladores han aprovechado estas perforaciones para desarrollar viviendas”.

Otro caso que comparte similitudes en ciertos aspectos claves es el denominado Castillo de Montezuma, localizado en el desierto de Arizona, en el Oeste de los Estados Unidos (Fig. 9). El emplazamiento, que lejos de ser un castillo, fue



construido por los pobladores Sinagua en la época precolombina, hacia el año 1100 antes de Cristo. Curiosamente, el castillo no tiene relación alguna con el emperador Azteca Montezuma, y su nombre fue dado así porque al ser descubierto en el siglo XIX se pensaba que los dominios del imperio Azteca llegaban hasta dichas latitudes.

La estructura, que abarca unos 5 pisos de altura, se encuentra excavada en un acantilado de caliza perteneciente a la Formación Verde (Figs. 10 y 11) del Mioceno-Plioceno. Dicha Formación corresponde a sedimentos lacustres originados por el represamiento del río Verde causado por eventos tectónicos (Nations et al., 1981).



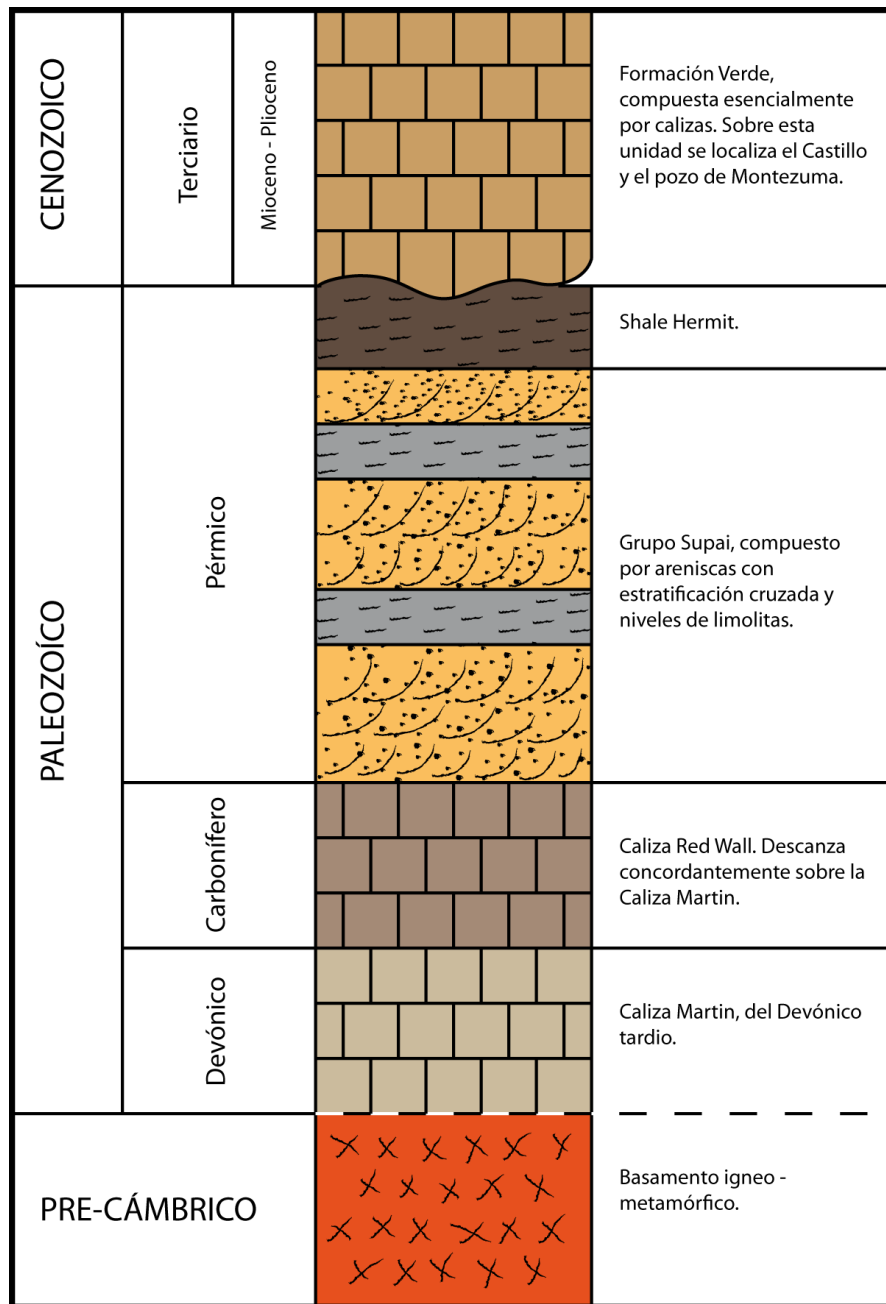
**Figura 9.** Localización del Castillo de Montezuma en el Estado de Arizona, Suroeste de los E. U. A. (Global Mapper 18.2).

Es interesante mencionar además que la región circundante al emplazamiento está dominada por un paisaje kárstico que posiblemente fue aprovechado por el pueblo



Sinagua para llevar a cabo la construcción de sus estructuras, y más importante aún, para almacenar y distribuir el recurso agua, tan necesario y escaso en un ecosistema desértico (Soto y Pate, 2013). Lo anterior puede confirmarse por la presencia del denominado Pozo de Montezuma, una depresión formada por el colapso de una capa de travertino, localizada 18 km al norte del Castillo (Fig. 12).

Nuevamente vemos como una característica geológica y geomorfológica induce a los pobladores a tomar decisiones sobre la ubicación y utilidad del asentamiento. En este caso la roca escogida es la caliza. Es interesante recalcar de nuevo que se utiliza el material para excavar sobre él y no como insumo para la elaboración de bloques para conformar la construcción. Esta situación parece estar apoyada por el hecho de que la caliza, al presentar planos de clivaje definidos es fácil de labrar y esculpir, por lo tanto, facilita la excavación al interior de la misma. Así mismo, su naturaleza es ambivalente; aunque presente planos de debilidad naturales relacionados al clivaje, la roca es estructuralmente resistente y compacta, lo que ofrece una buena protección contra el ambiente.



**Figura 10.** Columna estratigráfica generalizada de la zona donde se localiza el castillo de Montezuma (Adaptada de URL: [https://www.nps.gov/moca/planyourvisit/upload/Verde-Valley-Geology\\_2007.pdf](https://www.nps.gov/moca/planyourvisit/upload/Verde-Valley-Geology_2007.pdf) [13.10.2016] y <https://ngmdb.usgs.gov/Geolex/search> [14.10.2016]).



**Figura 11.** Vista general del Castillo de Montezuma enclavado en las paredes de un acantilado de caliza (URL: [http://www.arizonaruins.com/montezuma\\_castle/montezuma\\_castle.html](http://www.arizonaruins.com/montezuma_castle/montezuma_castle.html) [22.09.2016]).



**Figura 12.** Vista general del Pozo de Montezuma (URL: <http://blogs.scientificamerican.com/rosetta-stones/visiting-a-desert-karst-oasis-the-magic-of-montezuma-well/> [22.09.2016]. Imagen de dominio público. Crédito: Will Munny).

Otro factor que es importante acotar, y no solo para este caso, sino que puede trasladarse a los dos anteriores, es el factor climático. Si se observan detenidamente todos los ejemplos mencionados hasta ahora, el desarrollo de las urbes se lleva a cabo en lugares inhóspitos donde los componentes ambientales hacen en algunos casos improbable el hecho de situar una población allí. El factor de la temperatura es quizás uno de los más remarcables, puesto que tanto el Castillo de Montezuma como Petra se localizan en ambientes desérticos donde las variaciones de temperatura son muy marcadas entre el día y la noche. Es en este sentido que la decisión de excavar sobre la roca toma una relevancia fundamental, puesto que el material actúa como un aislante térmico que permite resguardarse del ambiente, de forma que en el día la temperatura es unos 2 o 3 grados más baja que en el exterior; mientras que por la noche, la roca guarda el calor remanente acumulado y mantiene las bóvedas o cavidades construidas a una temperatura confortable.

En cuanto al aspecto geomorfológico, se aprecia como el castillo está situado sobre las paredes de un acantilado a varios metros del suelo, lo que parece indicar que los pobladores buscaron cierto tipo de resguardo o protección al construirlo de esta manera. De esta forma, la geomorfología juega un papel crucial y provee una solución inmediata a partir de su naturaleza misma que a su vez es acogida y explotada de la manera menos invasiva. Sin embargo, la geomorfología de cañones no es la única característica del terreno aprovechada por el pueblo Sinagua. Puede pensarse en un principio que la construcción del asentamiento es inducida por la presencia del agua, la cual debe su existencia en la zona al relieve kárstico predominante en gran parte de la Formación Verde. Sin esta característica la ocurrencia y preservación del recurso sería difícil en un ambiente tan seco como lo es el desierto de Arizona; y es este fenómeno el que entienden y posteriormente desarrollan los pobladores para hacer de dicho lugar un entorno sustentable y plausible para el desarrollo de un asentamiento. Lo anterior puede ser confirmado por la presencia de construcciones alrededor del Pozo de Montezuma, así como un canal cuya función es distribuir el agua del pozo hacia las tierras más bajas y fértiles

donde posiblemente los Sinagua desarrollaban actividades de agricultura (Wetzel et al., 1999).

Ejemplos como los expuestos anteriormente pueden reportarse en diversas partes del mundo a lo largo de la historia humana: Las Cuevas de Ellora en la India, siglos VI a XI a. C.; las comunidades de los acantilados de Mesa Verde en el Estado de Colorado, que data del 1200 d. C.; Los monasterios de Vardzia de la Georgia medieval erigidas alrededor de 1185; El escarpe de Bandiagara en Malí, construido hacia el siglo XV; y muchos casos más repartidos en los cinco continentes (Fig. 13).

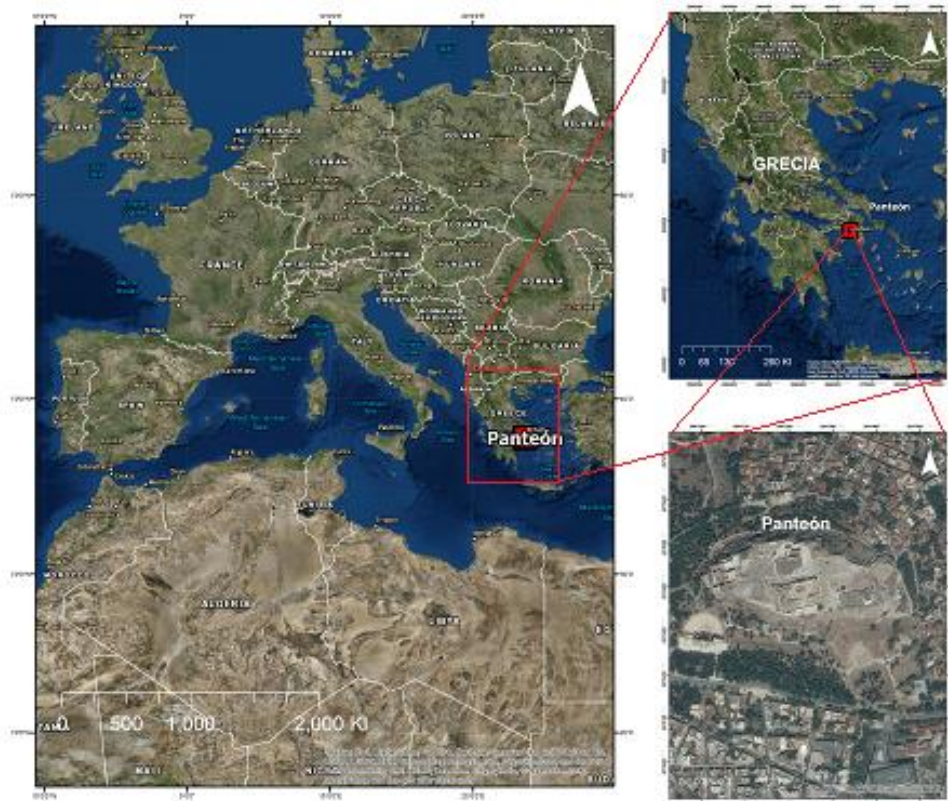
Los casos anteriores muestran un acercamiento mucho más profundo por parte de los seres humanos que construyeron dichas urbes en sintonía con el entorno, al punto donde las características físicas naturales marcaron y fijaron una hoja de ruta para la construcción y desarrollo de dichos emplazamientos. En este caso se aprecia de manera recurrente como dos características que ocurren de manera simultánea son la base esencial sobre la cual se edifican las urbes. Dichas características corresponden simplemente a un tipo de roca, generalmente detrítica, que tiene las condiciones geomecánicas adecuadas para ser excavada y ofrecer resguardo; y una geomorfología de cañones, la cual ayuda a exponer fácilmente la roca sobre la cual se va a excavar, y al mismo tiempo, en conjunción con la naturaleza de la roca (porosidad, permeabilidad, etc.) sirve como elemento para el transporte y almacenamiento de un recurso vital: el agua.





**Figura 13.** Mosaico de algunos ejemplos de construcciones excavados en roca alrededor del mundo. A, B y C. Cuevas de Ellora en la India (Singh et al., 2015 y URL: <http://www.fom.sg/Passage/2012/07ajanta.pdf> [19.01.2017]); D Cuevas de Vardzia (URL: <http://aspasiatravel.es> [19.01.2017]). E y F. Escarpe de Bandiagara (URL: [https://www.wmf.org/sites/default/files/article/pdfs/pg\\_38-45\\_bandiagara.pdf](https://www.wmf.org/sites/default/files/article/pdfs/pg_38-45_bandiagara.pdf) [19.01.2017]).

Sin embargo, estas civilizaciones no han sido las únicas que han potencializado su entorno para construir sus ciudades. Vemos como las antiguas polis griegas estaban marcadas en su construcción por un material preferente como lo es el mármol, tan abundante y común en la región del mediterráneo (Fig. 14). Y no solo eso, Crouch (1996), presenta indicios sobre como los griegos seleccionaban y construían sus ciudades de acuerdo a un entendimiento del tipo de paisaje predominante, en la mayoría de los casos de naturaleza kárstica, y como este jugaba un papel preponderante en la disponibilidad del agua y la producción de suelo, muchas veces bastante pobre para actividades agrícolas.



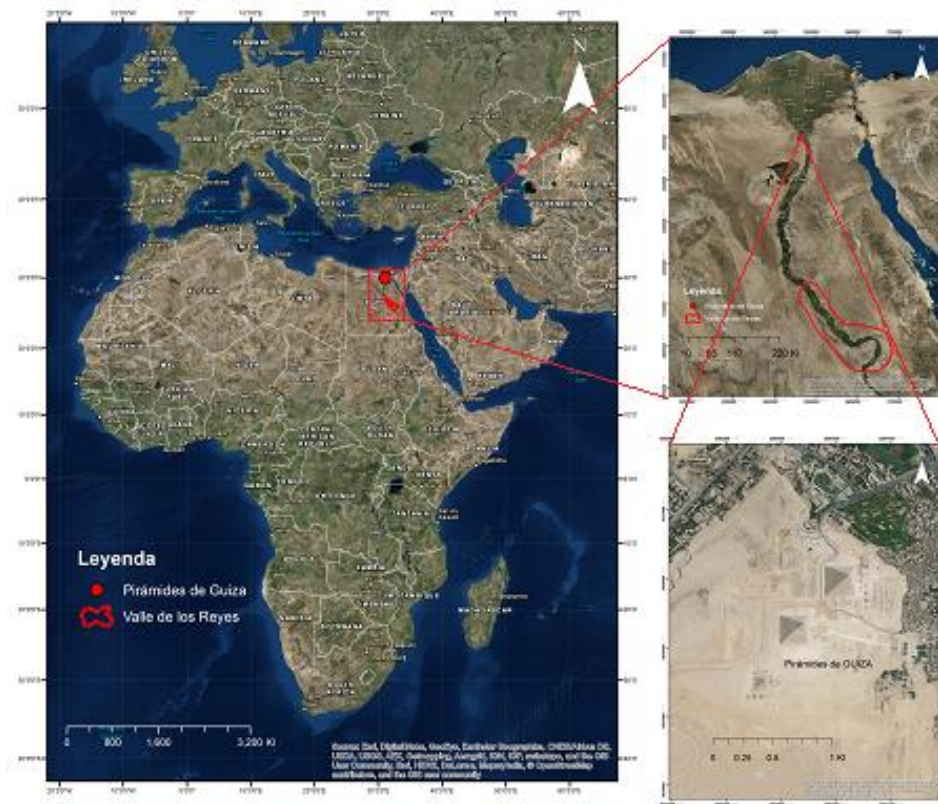
**Figura 14.** Localización actual de Grecia en el mar Mediterráneo (Global Mapper 18.2).

De esta forma, puede pensarse que la ubicación de algunas polis griegas obedecía a intereses basados puramente en las condiciones del terreno, que priorizaban sobre otros aspectos que usualmente son tenidos en cuenta para el establecimiento



de una población, como la localización estratégica para el comercio y su posición militar para la defensa. Así mismo, los registros históricos indican una larga relación entre las polis griegas y el paisaje kárstico, al punto donde se puede intuir que dicha civilización mostraba una clara preferencia por este tipo de paisaje al momento de decidir donde localizar una ciudad.

Igualmente, el antiguo Egipto estaba labrado en gran parte sobre las areniscas y rocas graníticas que conformaban los cuerpos geológicos en el delta del Nilo (Fig. 15). En realidad, y de acuerdo con Klemm y Klemm (2001), la civilización establecida en el oasis del río Nilo utilizó cerca de diez rocas diferentes como insumo o materiales de construcción directos para sus edificaciones y monumentos.

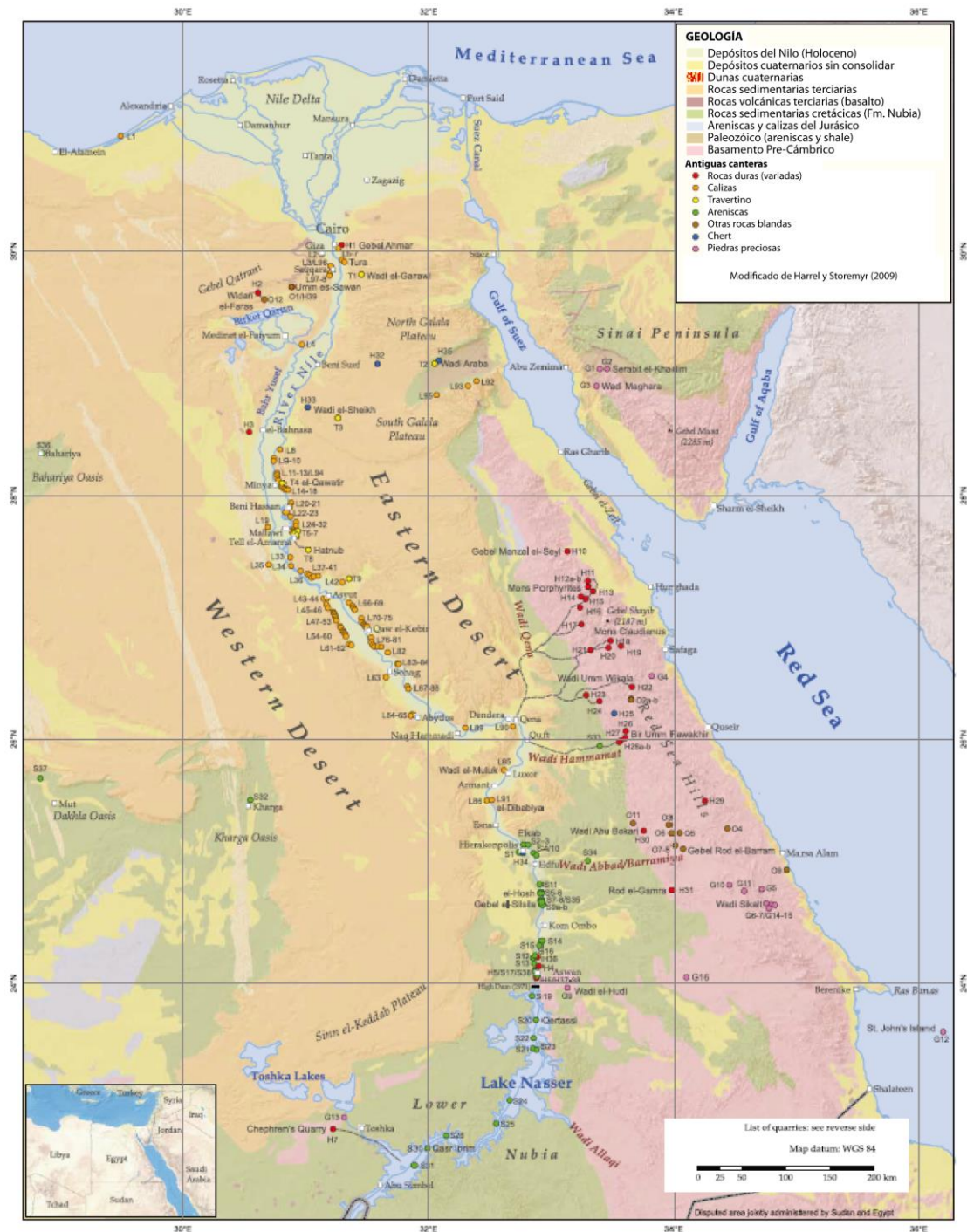


**Figura 15.** Localización de algunos asentamientos de la antigua civilización egipcia a lo largo del Nilo (Global Mapper 18.2).



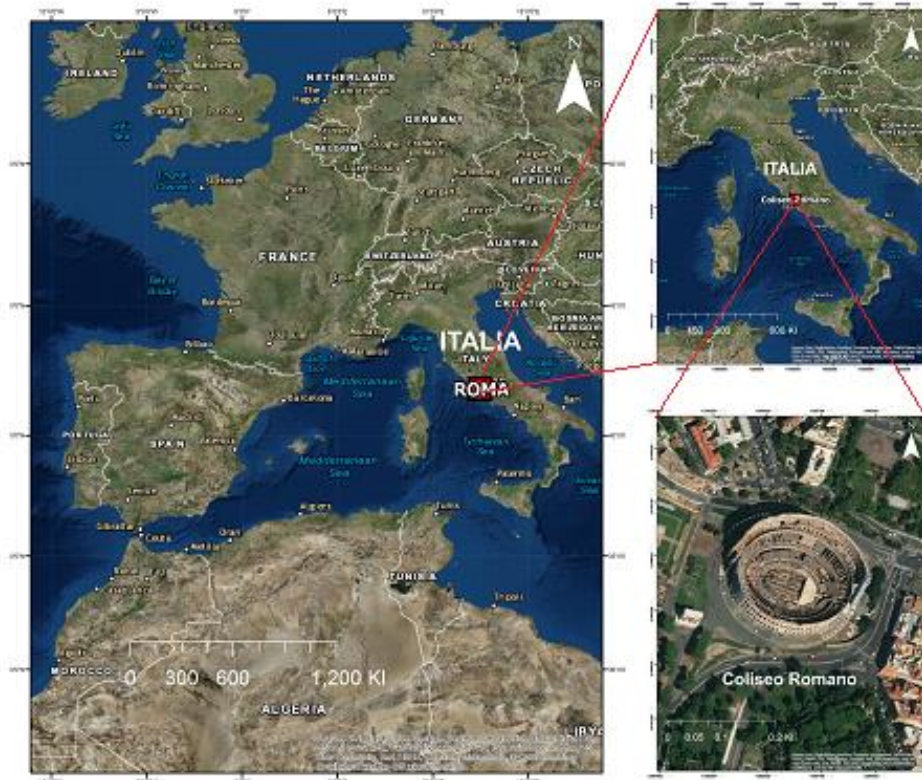
De manera general, las rocas cristalinas como los gneisses y granitos, que en su mayoría conforman las rocas del basamento, eran explotadas en canteras a lo largo del río para producir bloques, los cuales eran utilizados para la edificación de estructuras (Fig. 16). Es interesante anotar también que utilizaban los depósitos de arcilla y lodo del río Nilo como material aglutinante para el ensamblaje de los bloques elaborados con las rocas más duras. De esta forma, se tenía un uso específico para cada tipo de roca, de acuerdo a sus características físicas y mecánicas. Sin embargo, el entendimiento del entorno por parte de los egipcios no termina allí. Es de conocimiento general que el río Nilo presenta inundaciones anuales, las cuales corresponden a un periodo de más o menos tres meses; dicho fenómeno ha sido registrado desde la época de los faraones hasta la actualidad. Los antiguos egipcios entendían y conocían dicho evento, el cual aprovecharon para sistematizar sus cosechas y aumentar la producción de los depósitos blandos mencionados anteriormente utilizados como insumo de construcción. Este entendimiento conlleva a un dominio y un aprovechamiento del paisaje, que de lo contrario amenazaría el desarrollo y evolución de la civilización riverense.

## Canteras del antiguo Egipto



**Figura 16.** Canteras de roca dura y suave registradas a lo largo del cauce del Nilo, así como la geología predominante (Modificado de Harrel y Storemyr, 2009).

El imperio Romano (SPQR) tampoco fue ajeno al aprovechamiento de su entorno natural como herramienta impulsadora de su desarrollo. El epicentro del imperio, localizado en el centro de la península itálica, estaba construido casi en su totalidad a base de las tobas derivadas de las actividades volcánicas del Monte Sabatini y la Colina de Albano (Fig. 17).



**Figura 17.** Localización actual de algunas ruinas del antiguo imperio romano (Global Mapper 18.2).

Sin embargo, desde el punto de vista petrográfico y geomecánico, las tobas son rocas altamente variables en su composición y estructura, factor que las hace difíciles de utilizar como material de construcción. Pero es en este aspecto donde el imperio romano y sus arquitectos destacan sobre otras civilizaciones. De acuerdo con Jackson et al., 2005, los romanos adquirieron un entendimiento particular de su entorno y de los materiales disponibles en el mismo. De esta situación aprendieron a identificar cuales depósitos de tobas eran los más indicados para la construcción de acuerdo a sus características físicas, siendo la porosidad y la capacidad de

retener el agua algunas de las características más buscadas a la hora de elegir la roca. Si la roca no cumplía con dichas características, corría el riesgo de perder cohesión por las variaciones de temperaturas diurnas y nocturnas. Pero más sorprendente aún, es que si no se encontraba la roca con las condiciones necesarias, los romanos aprendieron a adecuarla utilizando otro factor geológico presente en la región: el travertino. A base de esta roca sedimentaria los romanos prepararon infinidad de mezclas o estucos para proteger de las condiciones ambientales sus preciadas construcciones elaboradas a base de toba y otros derivados volcánicos. De esta forma, aprovechando estas características geológicas Jackson et al., 2005 concluye en su estudio sobre el desarrollo de las ciudades romanas: “Observaciones de campo, así como documentos históricos (...) demuestran que los romanos entendían las propiedades de las tobas y sus ventajas, las cuales utilizaron para la construcción de elementos estructurales específicos (...)”. Dichas propiedades mencionadas por el autor se refieren a su capacidad estructural una vez ha sido adecuada, para soportar elementos constructivos significativos como arcos, columnas y bloques. Sin embargo, el uso de las tobas y el travertino no se limita a elementos constructivos como edificios o monumentos, sino que es llevado hasta una nueva expresión que significó el mejoramiento de un elemento urbanístico de gran escala que ayudó a la expansión del imperio: los caminos. Gran parte de los caminos romanos estaban pavimentados con una mezcla de concreto preparada a partir de derivados volcánicos, principalmente toba, combinados con travertino (cemento) y residuos vegetales y animales. Este avance técnico en cuanto a la mezcla y aplicación de diferentes materiales disponibles en la región se convirtió en un instrumento para la propagación del imperio por gran parte de Europa. Instrumento que significó una ventaja poderosa en comparación con la precaria tecnificación y desarrollo de los pueblos vecinos. La pregunta que viene a colación entonces es: ¿si las características geológicas fueron factores fundamentales para el desarrollo, expansión y consecuente éxito del imperio Romano? A lo cual puede responderse tentativamente con un no, puesto que el éxito y el alto grado de desarrollo expresado se debe en gran mayoría al



entendimiento y aprovechamiento de dichas características, y la forma como los romanos supieron potencializar los rasgos naturales, al acogerlos como un instrumento de desarrollo, en vez de desaprovecharlos y mirarlos como un elemento obstaculizador.

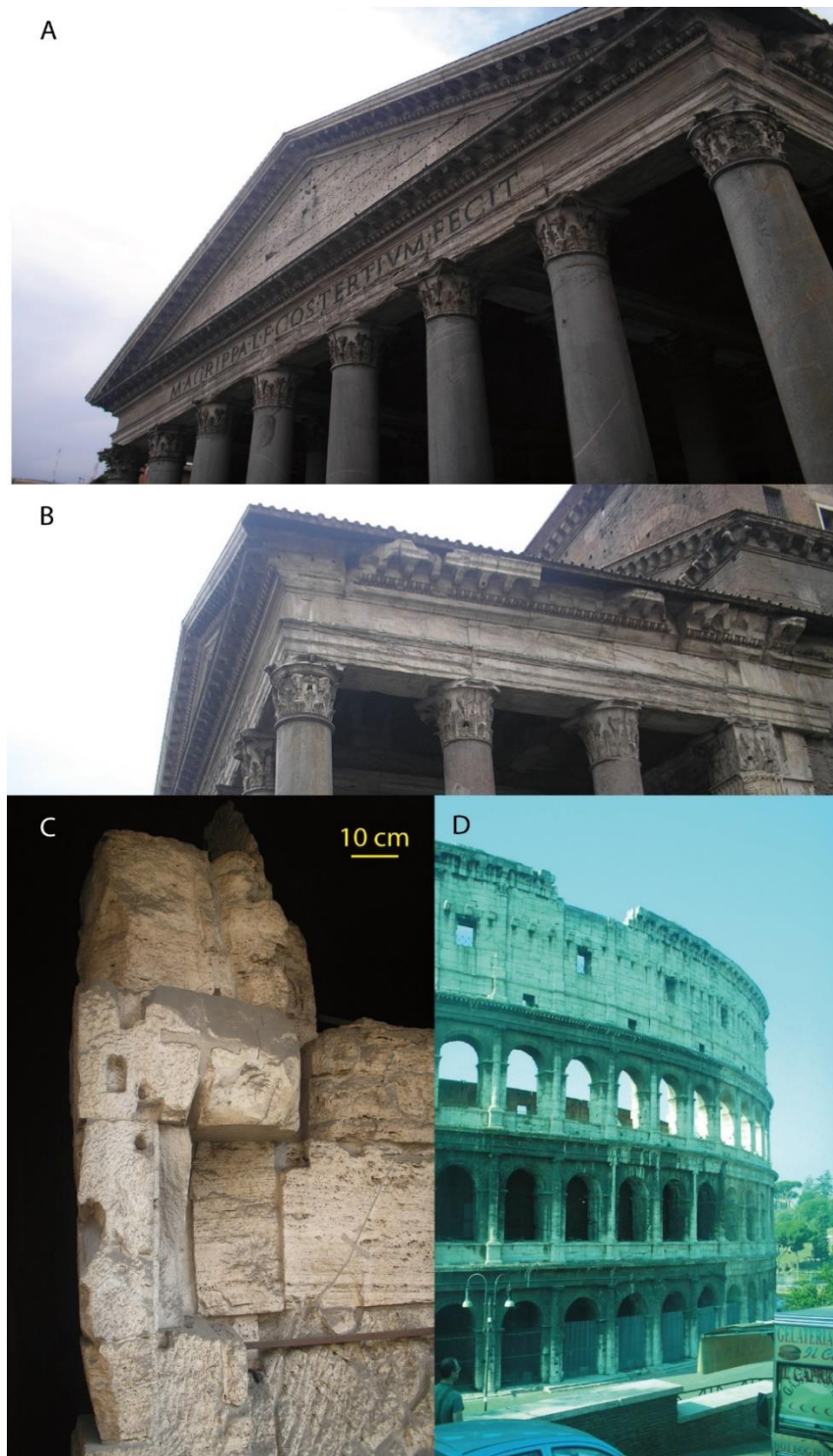
En los ejemplos anteriores vemos como hay una especie de resiliencia por parte de las civilizaciones para con su entorno (Figs. 18, 19 y 20). Esta resiliencia continuará a lo largo de la historia, como se analizará en los ejemplos que vienen a continuación, hasta el punto donde se pierde un poco de esta y es sustituida por el avance técnico, factor que comprometerá el equilibrio entre el entorno natural y el urbano.



**Figura 18.** Elementos arquitectónicos en la antigua Grecia: A. Teatro en Delphi (URL: <http://wserv4.esc.cam.ac.uk/escfieldwork/?p=282> [30.05.2017]). B. Panteón griego, Atenas (URL: <http://www.heritagedaily.com/2014/07/10-must-see-temples-in-greece/104070> [30.05.2017]).



**Figura 19.** Elementos constructivos presentes en la civilización del antiguo Egipto: A y B, Detalle del granito utilizado en gran cantidad de monumentos (Museo de Louvre, París y MET, Nueva York, respectivamente); C. Templo de Dendur, Periodo Romano (X a. C.) (MET, Nueva York); D. Obelisco de origen egipcio esculpido en roca intrusiva en Roma (Fotos archivo personal).



**Figura 20.** Materiales constructivos en la civilización Romana. A y B, Panteón romano, edificado en calizas y rocas graníticas (columnas). C. Detalle del travertino en las catacumbas cercanas al coliseo romano (D) (Fotos archivo personal).



## **5.2 Venecia y la relación de las ciudades con su entorno**

Anteriormente se expuso como un conjunto de ciudades antiguas potenciaban una o dos características geológicas para lograr un desarrollo particular, el cual les permitía una especie de simbiosis con el entorno natural. Dichos asentamientos estaban confinados en lugares donde los aspectos geológicos eran relativamente homogéneos. Pero ¿Qué ocurre con urbes más grandes y desarrolladas que deben coexistir con un rango de características más variables y adversas? Conforme la humanidad fue avanzando como especie su capacidad para expandirse y ubicarse en diferentes latitudes y ambientes creció, al ritmo que lo hizo el tamaño y la complejidad de sus asentamientos.

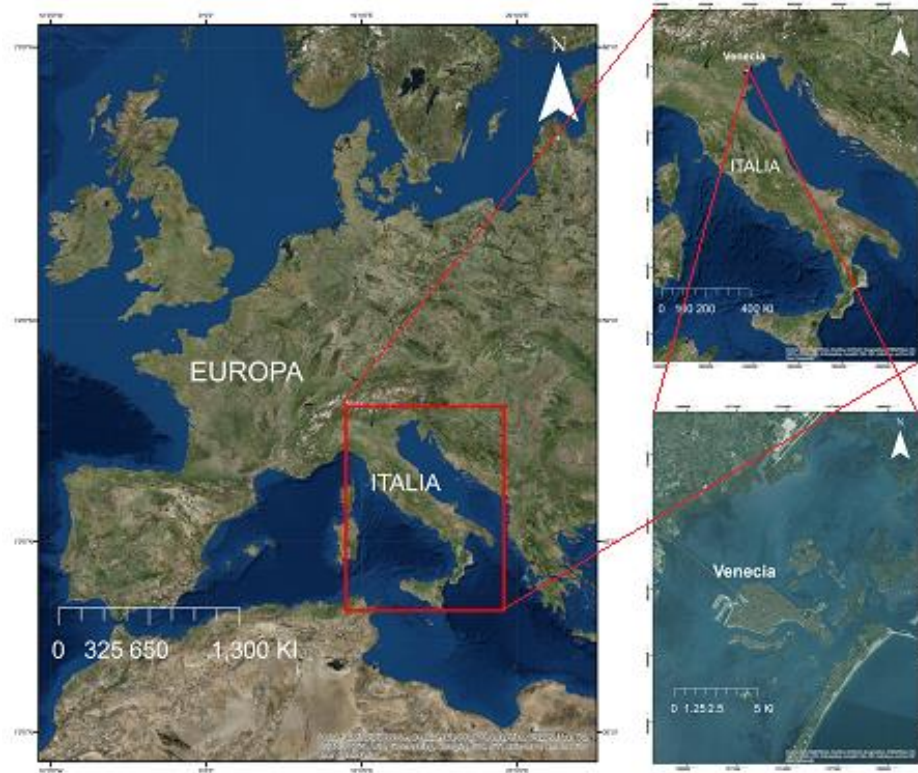
Un caso particular que demuestra esta capacidad del hombre de asentarse y adecuar diferentes tipos de ambientes para desarrollar una población es la ciudad de Venecia, en Italia.

Venecia se localiza en el nororiente italiano sobre las costas del Mar Adriático. Está situada sobre una laguna de agua salobre, la cual se encuentra protegida de la acción del mar por un conjunto de islas barreras, que a su vez generan canales que permiten la mezcla de aguas continentales y marinas (Fig. 21). A lo largo de su historia, los venecianos han considerado la laguna como un elemento de seguridad y protección frente a los enemigos, y es posiblemente por esta característica geomorfológica, que los primeros pobladores hayan decidido asentar una población en un ambiente tan cambiante y vulnerable como lo son las lagunas (Fig. 22).

Es por esta importancia estratégica, y por su misma condición de vulnerabilidad frente al mar que los venecianos han tratado de preservar la ciudad llevando a cabo intervenciones hidráulicas para proteger los canales y puertos para detener el hundimiento de la misma. Sin embargo, estas intervenciones han afectado la evolución natural del ambiente, situación que ha desbalanceado la entrada y salida de sedimentos, lo que ha desencadenado un proceso de erosión y subsidencia de la misma. Sumado a esto, el proceso de urbanización y la industrialización han modificado las características naturales, afectando el equilibrio hidrodinámico en



cuanto a la entrada y salida de agua dulce y salada, factor decisivo para la subsistencia de un ecosistema tipo laguna (Brambati et al., 2003).



**Figura 21.** Localización de la Ciudad de Venecia y la laguna veneciana (Global Mapper 18.2).



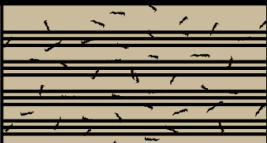
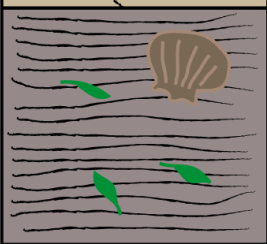
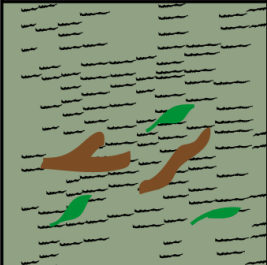
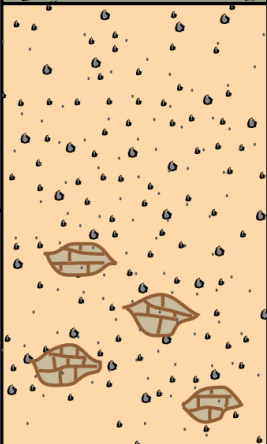

**Figura 22.** Aspecto actual de la laguna veneciana y el urbanismo al interior de la ciudad (Fotos archivo personal).

El ecosistema de laguna (y gran parte de su geomorfología) depende de una sumatoria de factores externos los cuales no fueron tenidos en cuenta al momento

de tomar la decisión de fundar una población como Venecia. Dichos factores comprenden la entrada y salida de agua dulce, la cual crea las condiciones necesarias para el desarrollo particular de ciertas comunidades y cadenas tróficas; el balance y aporte de sedimentos continentales, el cual debe estar en equilibrio con el proceso erosivo del mar, de lo contrario se presentaría una colmatación de la laguna; y por último una protección contra la acción erosiva y socavante del mar. Dada estas características, es plausible denotar a los ambientes lagunares como ecosistemas transicionales, que usualmente evolucionan por la progradación del continente hacia el mar, o por el contrario, por la invasión del mar hacia el continente (Fig. 23).

Dado el desconocimiento a largo plazo de estos factores, y al hecho de ser catalogado como un ambiente transitorio, los venecianos han luchado a lo largo de su historia contra la desaparición de su ciudad. Y a través de intervenciones hidráulicas han extendido la vida de la laguna, pero en consecuencia, han afectado de una u otra forma su evolución natural.

La situación geológico-urbana de Venecia es sostenida artificialmente debido a las intervenciones externas, sin embargo, hay un factor a escala regional y continental que no puede ser controlado. Además de los factores mencionados anteriormente, la subsistencia de las lagunas depende de fenómenos como la subsidencia continental y el aumento del nivel del mar. La tasa de subsidencia actual en Venecia es de unos 0.5 mm/año (Kent et al., 2002), la cual es originada principalmente por eventos tectónicos, sin embargo, esta se puede ver acrecentada por factores antrópicos derivados de la excavación de acuíferos y acueductos. De esta forma, la combinación de estos dos factores sumados al aumento global del nivel del mar, han ocasionado un hundimiento de 23 cm para Venecia en los últimos 100 años (Brambati et al., 2003).

CENOZOICO	Cuaternario	Holoceno		Relleno antrópico de sedimentos antropocenos indiferenciados.
				Arcillas y limolitas grises y grises oscuras con presencia de fósiles. Depósitos de Laggon asociados a una trasgresión.
				Arcilla verde oscura con presencia de materia vegetal. Puede indicar una invasión del mar.
		Pleistoceno		Deposito aluvial alterado. Conocido en la localidad como "Caranto". Presenta nosulos de calcita y representa un evento de trasgresión. Los pilotes que sostienen las edificaciones venecianas pueden llegar hasta este substrato.
				Planicie aluvial grano decreciente, depositada posiblemente durante la ultima glaciación. Coronada por Crevasse.

**Figura 23.** Columna estratigráfica generalizada en el substrato veneciano (Adaptada de Zezza, 2014).

Lo anterior es interesante, puesto que lleva a pensar que la geología urbana de Venecia no depende exclusivamente de los acontecimientos geológicos locales,

sino que además está fuertemente impactada por fenómenos de escala continental y planetaria, como los son los ya mencionados eventos de subsidencia y aumento del nivel del mar. A diferencia de los rasgos geológicos locales como el aporte de sedimentos y los cambios en las mareas, que si son controlados por parte de los venecianos, estos eventos a gran escala son en última instancia los que probablemente dicten sentencia sobre el futuro de la laguna veneciana.

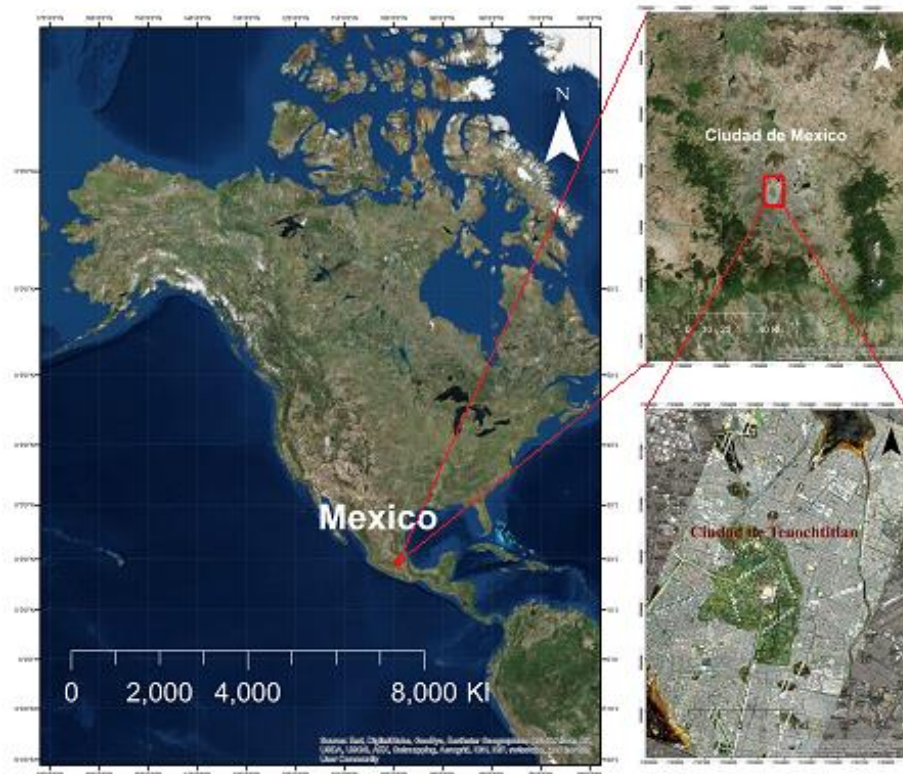
Es por esta razón que la geología urbana de Venecia y el concepto en general debe desligarse del ámbito local y extender sus esfuerzos y entendimiento a escalas globales, reconociendo de esta forma que el desarrollo y subsistencia de nuestras ciudades también dependen de eventos de gran magnitud, los cuales generalmente nunca son asumidos o tenidos en cuenta al momento de planificar y erigir los lugares donde habita el 80% de la población mundial.

Es pues el caso de Vencía de gran interés general y académico para la geología urbana, puesto que se conjugan esfuerzos para sostener la ciudad derivados de un conocimiento local, mientras son ignorados o desconocidos eventos de gran magnitud que ponen en entredicho el conocimiento y dominio del entorno por parte de los venecianos antiguos y actuales. De este caso, vemos como el concepto de la geología urbana debe desprenderse del ámbito local, para focalizarse en entender como procesos de escalas más grandes también influyen sobre los procesos de desarrollo urbano.

### **5.3 La cuenca de México y la evolución del entorno**

La cuenca del centro de México ha sido cuna de una gran cantidad de asentamientos y civilizaciones por más de 25.000 años. La gran variedad de pueblos que se han localizado allí han tenido una filosofía de desarrollo en común: preservar el entorno natural para poder subsistir a partir de él. Desde los primeros pobladores caracterizados por nómadas y recolectores, hasta la civilización Mexica y la llegada de los españoles hacia el año 1520 d. C. ha existido un elemento que ha servido como motor impulsador del desarrollo y la prosperidad para los diferentes pobladores: el Lago de Texcoco.

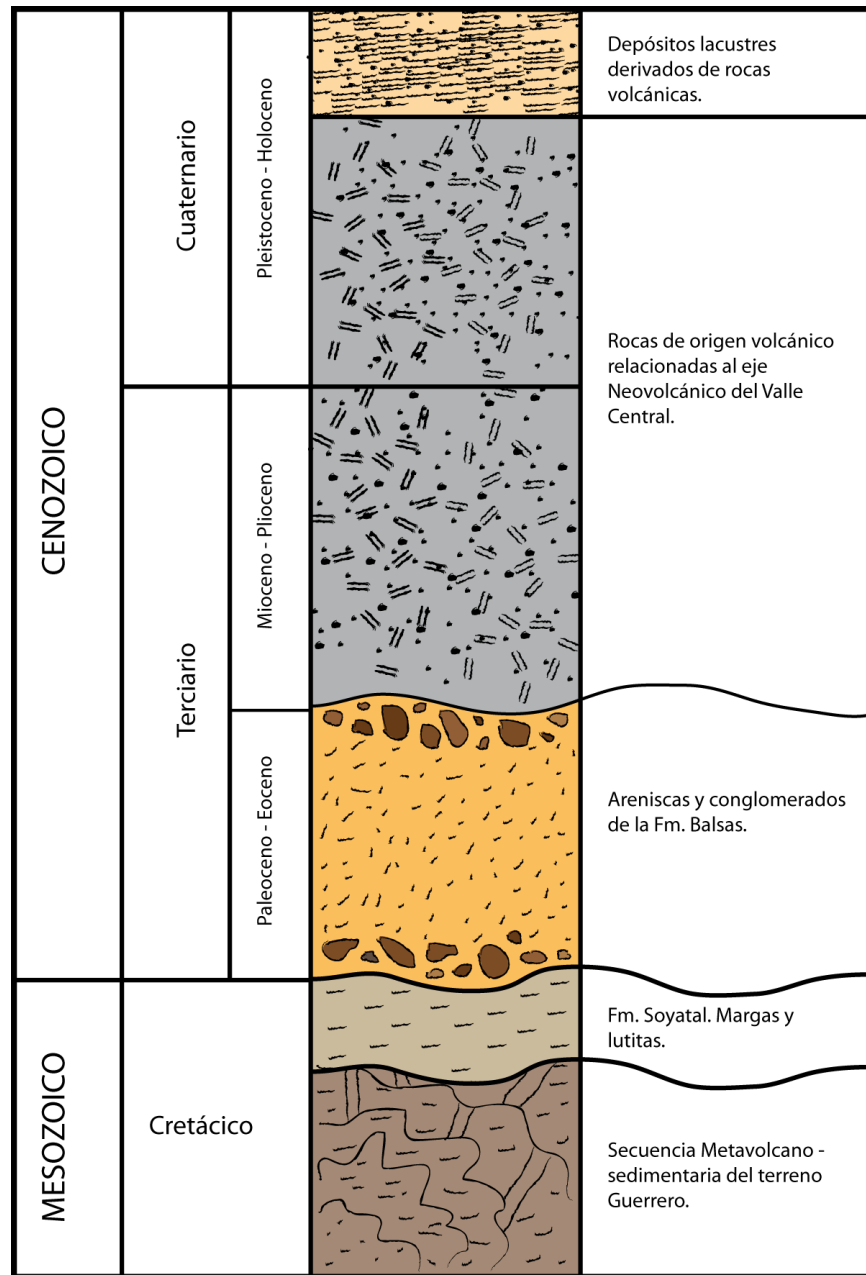
El Lago de Texcoco formaba parte de un sistema de lagos localizados en el valle de México, lugar donde se asienta gran parte de la capital de la República Mexicana actualmente (Fig. 24). El lago cubría unos 2.000 km<sup>2</sup> y se caracterizaba por ser poco profundo. Estaba rodeado de un cinturón volcánico denominado Arco Volcánico Trans-americano (AVT), el cual recorre el estado de México de manera transversal desde el Pacífico hasta el golfo de México (Vázquez y Jaimes, 1989). Esta característica natural permitía el florecimiento de una gran cantidad de plantas y especies, así como la presencia de diferentes cuerpos de roca de naturaleza ígnea, que fueron utilizados como insumo para la construcción de las diferentes poblaciones que se localizaron alrededor del lago.



**Figura 24.** Localización de la Tenochtitlan en la actual ciudad de México (Global Mapper 18.2).

De hecho, nuevamente, la configuración o sumatoria del terreno lacustre, más la presencia de materiales adecuados para erigir elementos urbanísticos pueden

haber persuadido a todos los pueblos que se asentaron allí a tomar semejante decisión en cuanto a la localización de su espacio vital (Fig. 25).



**Figura 25.** Columna estratigráfica generalizada del Valle del Centro de México (Adaptada del Servicio Geológico Mexicano, 2002).

En el caso de los Mexicas y sus ciudades flotantes, el lago se convirtió en el motor de desarrollo y expansión del imperio, puesto que fue utilizado como vehículo sobre



el cual se transportaron, a través de barcazas, los insumos y materia primas que sirvieron para erigir el centro de poder: la ciudad de Tenochtitlán (Fig. 26). Sin este elemento natural, el transporte de los pesados bloques de piedra obtenidos en canteras alrededor del lago hubiera sido una tarea de proporciones descomunales, factor que hubiera retrasado considerablemente el auge de los Mexicas. Igualmente, y según autores como López et al., 2003 el éxito de estos se debe al importante intercambio comercial y a las buenas relaciones que sostuvieron con sus vecinos lacustres, situación donde el lago nuevamente es un elemento facilitador de este tipo de actividades, dadas sus características benévolas para la navegación.



**Figura 26.** Concepción artística (posiblemente española) de la ciudad de Tenochtitlan en el lago Texcoco (Tomado de: Aguilera, 2013).

Sin embargo, los Mexicas no fueron los únicos que se aprovecharon del entorno lacustre para proyectar su avance y progreso. Siglos antes ya se habían asentado en las orillas del lago pequeños pueblos recolectores y cazadores que obtenían todo su sustento alimenticio, así como otros materiales del ecosistema circundante. Igualmente, estos primeros pueblos desarrollaron construcciones y expresiones arquitectónicas inspiradas y adaptadas del entorno, lo que les significó un equilibrio

y un bienestar plausible en pro del avance de la sociedad. Posterior a estos primeros pobladores aparece la ciudad de Teotihuacán, cuyos pobladores originales aún permanecen en el olvido y el desconocimiento.

Teotihuacán fue encontrada por la cultura Mexica ya en su decadencia. La ciudad, a diferencia de su sucesora, Tenochtitlán, no se asentó directamente sobre el lago Texcoco, sino que fue erigida en las riveras que alimentan dicho lago sobre la cuenca de México. Dicha cultura optó también por aprovechar y modificar su entorno natural para obtener materias primas (como la obsidiana y otros derivados volcánicos) y adecuar la agricultura mediante elaborados sistemas de riego que suplieran las necesidades alimenticias de la población (López, 2003). Es importante destacar la importancia de dichos sistemas de riego, ya que dan indicios de la posible resiliencia de esta civilización con el ambiente, en el sentido de la planificación y el sostenimiento de su cultura a partir del dominio de las actividades esenciales para la vida diaria. Lo anterior toma más relevancia, si ponemos en evidencia la poca precipitación sobre la cuenca de México, la cual no superaba los 700 mm/año (López, 2003). En este sentido, dicha cultura identificó las carencias y desventajas del entorno natural y planificó su desarrollo a partir de elementos o avances técnicos que suplieran o disminuyeran dichas carencias.

Autores como López (2003) señalan que la ciudad de Teotihuacán pudo alcanzar una población superior a los 100.000 habitantes en su apogeo, situación que ocasiono una gran presión sobre el ambiente y la disponibilidad de los recursos naturales. Sin embargo, esto no representó un mayor problema para los pobladores originales puesto que supieron adaptarse de manera racional soportados a su vez por un avance técnico que mantuvo el equilibrio entre lo natural y la expansión urbana. Dada esta situación de armonía con el entorno, ¿Qué fue entonces lo que ocasionó la debacle de Teotihuacán y sus misteriosos pobladores? La respuesta a esta cuestión no es sencilla de vislumbrar, aunque si es posible trazar indicios que provean una explicación satisfactoria: estas ciudades no estuvieron exentas de amenazas naturales. El éxito mismo de su tecnificación y desarrollo los condujo a



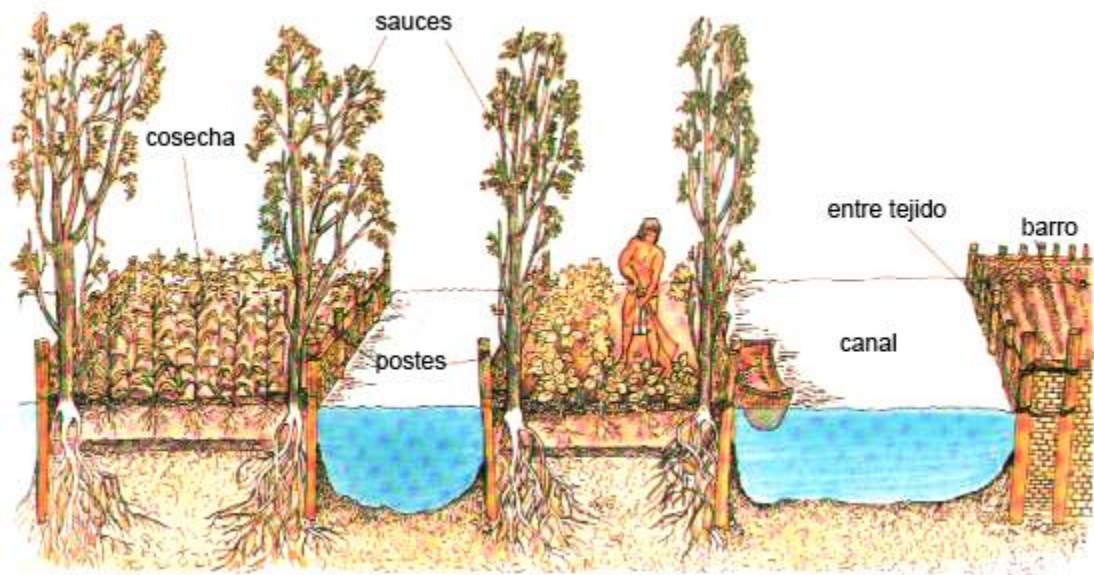
una sobreexplotación de sus recursos naturales disponibles. Si a esto se le suma la acción de cambios climáticos (agentes externos y fuera de control), se entiende entonces que se manifiesta una presión extra sobre el entorno, lo que pudo haber incidido en la escasez de alimentos y otros bienes esenciales para el sustento del estilo de vida (López, 2003).

Pese a que la cuenca de México es rica en recursos hídricos, como el lago Texcoco, la presencia de lluvias ha sido muy variable a lo largo del tiempo, situación que denota un delicado equilibrio que en muchos casos amenazó a las comunidades que habitaron allí. De acuerdo a esto, los efectos y cambios climáticos adversos impactan con más fuerza sobre ecosistemas frágiles, donde el recurso agua es un factor fundamental. Nuevamente es imperativo señalar como un agente global (de escala planetaria) influye considerablemente sobre el desarrollo y subsistencia de un entorno urbano. Los pobladores de Teotihuacán fueron muy conscientes del manejo y aprovechamiento que le dieron a su entorno vital, demostrando un entendimiento de los factores adversos como la escasez de agua, la cual sortearon de manera resiliente al adaptar complejos sistemas de riego. Sin embargo, su grado de tecnificación y avance no era lo suficientemente evolucionado para intuir o prevenir problemas provenientes de agentes externos como los cambios climáticos, posiblemente originados por una suma de factores sumamente complejos y aleatorios ocurridos en diversas partes del planeta. Es en este sentido donde las adversidades ocurridas a Teotihuacán toman relevancia, puesto que ahora, gracias a nuestro avance científico, es posible vislumbrar los posibles cambios y amenazas que se deslignan de un inminente cambio climático, y como estas van a dictaminar, y en muchos casos sentenciar el proceso de expansión y desarrollo de nuestras urbes, y por qué no, de nuestra forma de habitar y relacionarnos con el entorno.

Retomando el tema del desarrollo Mexica y la ciudad de Tenochtitlán, esta fue fundada alrededor de 1324 d. C. comenzando como un pequeño islote en una de las costas meridionales del lago Texcoco. El entorno presentaba una naturaleza ambigua para la creación y expansión de una ciudad: por una parte, contenía

grandes cantidades de elementos básicos para el desarrollo de la vida diaria como el agua en abundancia y la presencia de diferentes materias primas derivadas de los cuerpos rocosos presentes. De manera contraria, las costas del lago no presentaban las condiciones naturales ni mecánicas para asentar una ciudad de grandes proporciones, dadas, irónicamente, la gran cantidad de agua y humedad que hacían de los suelos bases relativamente débiles para soportar grandes estructuras. Dicha situación ocasionó probablemente unas condiciones de vida precarias en los inicios de la ciudad.

Sin embargo, esta situación no detuvo al pueblo Mexica. Este posible obstáculo los llevó a estudiar minuciosamente el entorno y sus materiales disponibles, puesto que en estos recursos básicos se encontraba la respuesta para adaptar y disminuir las evidentes imposiciones naturales del terreno lacustre. De esta manera, los mexicas retomaron una antigua técnica agrícola conocida como chinampas y la adaptaron para expandir y adecuar el terreno sobre el cual se podían edificar estructuras. Las chinampas consistían en terrazas artificiales, las cuales se elaboraban a partir de capas de tierra de diferente naturaleza confinadas a presión dentro de espacios rectangulares demarcados por 4 troncos localizados en las esquinas (Fig. 27). A menudo, los pueblos anteriores a los mexicas utilizaban diferentes mezclas de tierra para cultivar diversas especies. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, los mexicas adaptaron este avance técnico, no para contribuir con su sustento alimenticio, sino para expandir su entorno vital, al ganarle terreno al ambiente lacustre mediante la organización de chinampas de gran tamaño, las cuales constituyeron nuevo terreno firme sobre el cual se expandieron los principales rasgos urbanos.



**Figura 27.** Estructura de las chinampas. Nótese como se confinan diferentes capas de tierra mediante cultivos y postes de madera en los extremos

(<http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2010/04/22/135942> [28.05.2017]).

Sumado a lo anterior, como los Mexicas entendían que el lago era el motor del imperio y el elemento morfológico que las garantizaba un bienestar y una continuidad en el tiempo, era imperativa y profundamente necesaria su preservación. Para esto, llevaron a cabo la construcción de puentes, presas, reservorios y acueductos, que en menor o mayor medida impactaron el ambiente lacustre, sin embargo, fueron llevados a cabo de tal forma que no causaron un deterioro irreversible (López, 2003).

Desde el punto de vista geológico, un terreno lacustre es totalmente desfavorable para el desarrollo urbanístico. Sin embargo, los Mexicas en lugar de ver un obstáculo, decidieron potencializar las ventajas del lago, como la facilidad del transporte y la comunicación y la inmediatez del recurso básico, para adaptar y modificar las características adversas a través de avances técnicos como las chinampas.

El recurso agua era el eje del imperio y su preservación era de vital importancia para asegurar una calidad de vida a sus habitantes. Sin embargo, dicha tarea no era sencilla, dada la complicada situación hidrográfica que plantea una cuenca endorreica como lo es la cuenca de México, situación que presenta un delicado equilibrio en cuanto al balance total de agua que entra y sale (por evaporación).

El Lago Texcoco donde se asentaba la ciudad de Tenochtitlán, es el lago más bajo en altitud en la cuenca de México. Es alimentado por corrientes provenientes de los lagos superiores, la desglaciación de las montañas circundantes y la escorrentía. Debido a esto, el lago recoge las aguas de todo el sistema cerrado en un solo punto, donde solo podían salir por evaporación. Si el proceso de evaporación era mayor que la cantidad de agua entrante en el lago, la ciudad de Tenochtitlán probablemente hubiera desaparecido.

Además del delicado equilibrio, el hecho de ser el lago más bajo y el último reservorio de una cuenca endorreica plantea otro problema: Las montañas y volcanes circundantes al lago están conformadas por rocas ígneas extrusivas ricas en concentraciones de sales y minerales salinos, lo que ocasiona una concentración de dichos compuestos en el lago, de forma que la salinidad de este llegaba a ser más alta que la salinidad del mar (Sosa, 2010). Lo que puede llevar a pensar que el agua del lago posiblemente no era utilizada para consumo humano, y en contraposición, era usada como un medio de desecho y de transporte como ya se mencionó anteriormente. Sin embargo, respecto a dicha característica, aún quedan ciertos interrogantes sobre cómo afectaba esto a los mexicas, y de ser así, ¿cómo lo manejaban? Además, ¿si el cuerpo de agua sobre el que se asentaba la ciudad no poseía las características adecuadas para el consumo humano, de donde se abastecía la población de este recurso vital? Quizás esta última pregunta puede tener respuesta, puesto que de acuerdo con Sosa (2010), el lago Texcoco se encontraba rodeado de múltiples manantiales y oasis que se alimentaban del agua lluvia durante las épocas de invierno, por lo cual es bastante probable que la ciudad se abasteciera de dichos acuíferos.

Si bien muchas de las características propias del lago Texcoco y la civilización Mexica aún son fuente inagotable de estudio y suscitan muchos interrogantes. Una de las pocas realidades que podemos comprobar es el efecto devastador de la llegada de los europeos al continente americano, y con esto, la imposición de sus “avances” técnicos, los cuales, para el caso concreto de Tenochtitlán, ocasionaron una pérdida del conocimiento hidráulico específico del lago, y por consiguiente un desequilibrio marcado entre el entorno natural y el desarrollo urbano particular sustentado en dicho ecosistema.

Al arribar los españoles a la cuenca del lago, asociaron inmediatamente la poca movilidad del agua y el hecho de rodear la ciudad como un ambiente poco saludable propicio para la propagación de enfermedades (Tortolero, 2000). Sumado a lo anterior, una sucesión de inundaciones llevó a los españoles a drenar más rápidamente el agua “excesiva” de los lagos como medida sanitaria y de prevención contra futuros desastres. De esta forma, el conocimiento autóctono de los mexicas de una concepción urbana que gravitaba alrededor del lago, empieza a desaparecer y es reemplazado por la supuestamente más avanzada técnica europea de ordenamiento urbano cuadrículado, poco consciente de las particularidades del entorno, concebido para maximizar el espacio, las facilidades de comunicación y la producción (Fig. 28). El cambio y la pérdida del conocimiento hidráulico azteca fue paulatino, apoyado en parte por el poco conocimiento de los españoles en la materia.



**Figura 28.** Antiguo mapa de la bahía de Cartagena y la ciudad amurallada realizado por el italiano Violante Vanni en 1777 (<http://recursos.bibliotecanacional.gov.co/content/geograf%C3%AD-y-cartograf%C3%AD-imperios-censura-y-rivalidad> [21.12.2016]).

El drenaje del lago y la destrucción de las obras hidráulicas construidas por los mexicas continuó a lo largo de los siglos XVII y XVIII; igualmente, los ríos y abrevaderos que alimentaban el lago fueron intervenidos fuertemente, de forma que se fue cortando el suministro de agua al cuerpo principal. Debido a esto, los problemas relacionados a la calidad del agua y el abastecimiento del recurso por parte de la población se fueron acrecentando. En ocasiones, las autoridades españolas pensaron en reubicar la ciudad, sin embargo, el alto costo y la complejidad de la relocalización de la población desecharon por completo esta iniciativa, aunando a la creencia y mandatos reales que exigían que la ciudad europea, denominada Nueva España, debía erigirse sobre los escombros de la



antigua civilización recién emancipada, como símbolo de poder y nueva autoridad (Musset, 1996 en Sosa, 2010).

La intervención antrópica del entorno continuó debido a constantes inundaciones que afectaron la población, principalmente los sectores más pobres y vulnerables. Al ser la situación tan recurrente, las autoridades emprenden la construcción de una obra definitiva que terminaría de drenar los remanentes del lago Texcoco. Dicha obra se concluyó en 1900, y consistió en un canal abierto (denominado Gran Canal) de 50 km de longitud, el cual evacuaba  $27\text{m}^3/\text{s}$  de aguas residuales a los ríos Tuna y Panuco (Sosa, 2010). A partir de esto, aparecen una serie de complicaciones que afectan a la ciudad hasta el día de hoy. Quizás la más amenazadora y la más documentada sea el hundimiento de la urbe y su incremento de la vulnerabilidad por los terremotos como consecuencia del fenómeno de licuefacción del suelo (Fig. 29).



**Figura 29.** Ángel de la Independencia en Ciudad de México. Se observa un hundimiento en la base con el paso del tiempo. En un siglo se han tenido que aumentar el número de escaleras con respecto al suelo para poder acceder al monumento (Tomado de: Aguilera, 2013).

Según autores como Ovando-Shelley et al., 2007, la Ciudad de México ha experimentado tasas de hundimiento entre 13 cm/año hasta más de 20 cm/año en el siglo XX. Para un promedio de subsidencia de hasta 8 m en los últimos 100 años en ciertas zonas. El proceso de hundimiento ha causado numerosas pérdidas

económicas en estructuras, así como áreas adecuadas para la urbanización. Y no solo eso, los importantes monumentos del centro histórico, erigidos sobre los escombros de la antigua ciudad mexicana se ven altamente amenazados por el fenómeno. Como consecuencia de este proceso de hundimiento, la Ciudad de México se encuentra hoy en día en un nivel mucho más bajo, haciéndola propensa a las inundaciones, y paradójicamente, en ciertas zonas, escasea el recurso agua para ciertos sectores de la población. Al ser escaso el vital recurso, los habitantes recurren a la excavación de pozos, en muchos casos artesanales, para tener acceso al recurso, sin embargo, esta práctica acrecienta aún más el proceso de subsidencia en dichos sectores. De esta forma, el hundimiento se presenta como un círculo vicioso, originado por la prevalencia de un supuesto avance técnico por parte de los españoles, sobre el “rudimentario” entendimiento de los mexicanos de su entorno natural particular.

Además del fenómeno de hundimiento, debido al margen tectónico donde se ubica el valle de México, la ciudad se encuentra en una zona de sismicidad alta por la interacción entre la placa de Cocos y la placa Norteamericana (Rosenblueth et al., 1992). Los Mexicanos y Tenochtitlán igualmente lidiaron con este problema, sin embargo, y a pesar de múltiples catástrofes, los pobladores originales supieron sortear dicho fenómeno, a lo cual surge la pregunta, ¿si el lago en su estado natural, y su novedosa técnica de construcción caracterizada por las chinampas ayudaron a mitigar de mejor forma los eventos sísmicos?

Actualmente el problema con los sismos es de gran preocupación por las autoridades y el público en general. Los episodios sísmicos siguen siendo recurrentes, con una periodicidad no muy diferente de los tiempos precolombinos; sin embargo, la afectación y daños causados por los mismos son muy superiores. Esto se da en gran parte por los sedimentos lacustres del lago Texcoco sobre los que se asienta la ciudad. Al ser drenado el lago, los sedimentos remanentes (de tipo lacustre finos) se acumularon en potentes espesores en la parte central de la cuenca. Dichos sedimentos se encuentran sobresaturados por su origen lacustre.



Al ser sometidos a los movimientos sísmicos, la masa poco cohesiva se comporta como un elemento plástico, que en ocasiones puede tomar hasta cierta naturaleza líquida, suscitando de esta forma el fenómeno de licuefacción del suelo.

El caso particular de la Ciudad de México evidencia de diferentes formas como los supuestos avances técnicos en muchas ocasiones no superan el conocimiento autóctono. Los mexicas concibieron un desarrollo urbanístico cimentado en una característica geológica particular que dominaba el terreno: el lago. Aunque pudiera parecer un obstáculo y un ambiente totalmente adverso para el emplazamiento de una población, los mexicas toman dichas desventajas y las manipulan o acogen de forma que se conviertan en un vehículo de desarrollo. Por lo tanto, el estado natural del entorno se ve poco afectado. Además de esto, desarrollan avances que se entrelazan perfectamente con la característica natural que deciden preservar. De esta forma, surgen las chinampas; avance técnico que les permite apropiarse del entorno natural de una manera más orgánica y menos invasiva. El éxito del desarrollo mexica se basa pues en el entendimiento y conservación original del entorno. Esto no quiere decir que la naturaleza no los haya azotado en distintas ocasiones (inundaciones, terremotos, etc.). sin embargo, debido al modelo de desarrollo implementado, las consecuencias de dichas catástrofes nunca pasaron el punto de no retorno, puesto que el espacio vital siempre seguía su curso natural y volvía a un estado de equilibrio.

En contraposición, con la llegada de los españoles, se decide desechar dicho modelo e implementar, con avances técnicos en la ingeniería, el modelo europeo predominante en la época. El resultado, como se ha mencionado en los párrafos anteriores, consiste en una serie de transformaciones que conllevan finalmente a un cambio drástico del entorno: la desaparición del lago. Lo que da inicio a una sucesión de complicaciones, de las cuales la Ciudad de México moderna aun siente sus síntomas. Del drenaje del lago, al hundimiento de la ciudad y la licuefacción de los suelos, el desconocimiento propio del entorno ha llevado a los mexicanos a una

cadena de sucesos que parece repetirse sin fin, y de la cual no parece vislumbrarse un cambio a corto plazo.

## **5.4 Las ciudades modernas y la geología como motor de desarrollo**

En los párrafos anteriores se ha hecho un seguimiento a través de la historia de diferentes casos que ejemplifican el concepto de Geología Urbana. Se ha procurado presentar los diferentes ejemplos en el orden cronológico más acertado, desde Petra, hasta Ciudad de México, en su etapa colonial y moderna. El caso actual de la Ciudad de México nos introduce al modelo de ciudad contemporánea, donde un sinfín de dinámicas e interacciones crean un entramado de procesos humanos y naturales que le dan esa característica propia de dinamismo a las urbes modernas.

En este apartado se continuará sobre esta temática, donde se abordarán casos de grandes ciudades modernas, las cuales adquieren algunos rasgos distintivos que las hacen reconocibles gracias a la geología y la geomorfología sobre la que se erigen.

### **5.4.1 La geología de Nueva York y los grandes rascacielos de Manhattan**

La ciudad de Nueva York, y en especial, la isla de Manhattan, son mundialmente reconocidas como la ciudad cosmopolita por excelencia. Es una urbe multicultural de más de 18 millones de habitantes (U. N., 2016), donde confluyen un sinnúmero de razas, religiones, creencias y estilos de vida. Cualquier vista de la ciudad se ha vuelto icónica, especialmente por su inconfundible *skyline*, el cual parece estar grabado en la memoria de la mayoría de personas (Fig. 30). Pero dicho *skyline*, así como las características vistas de la ciudad, y por qué no, su imagen de potencia económica en general, tienen sus bases (literalmente) en una sumatoria de aspectos geológicos.

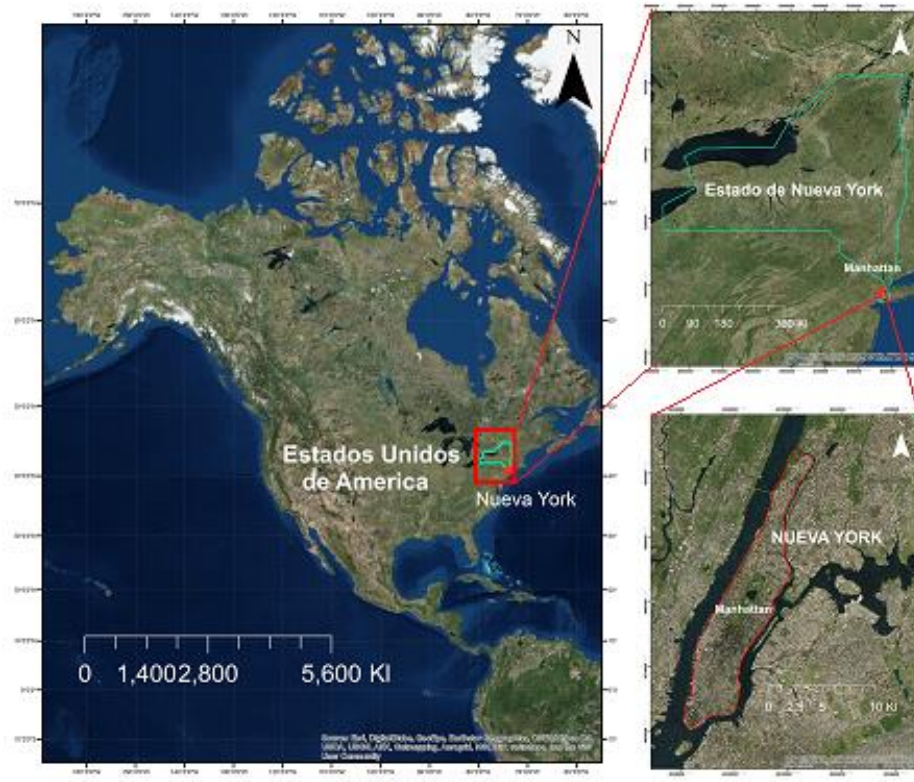


**Figura 30.** Panorámica de Manhattan tomada desde el Empire Estate. Se aprecia el río Hudson a la derecha y el distrito financiero, con la Freedom Tower en el centro (Foto archivo personal).

Nueva York se encuentra en la costa Este de los Estados Unidos, en el extremo suroriental del Estado homónimo (Fig. 31). La ciudad se encuentra atravesada principalmente por el río Hudson y está dividida en 5 distritos: Bronx, Brooklyn, Manhattan, Queens y Staten Island.

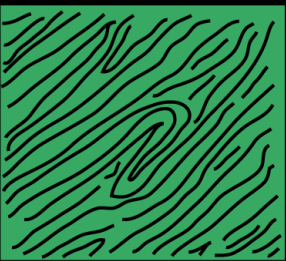
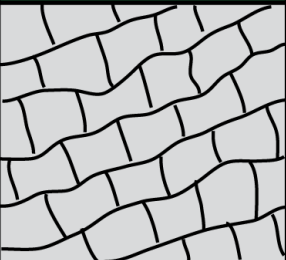
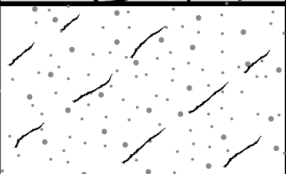
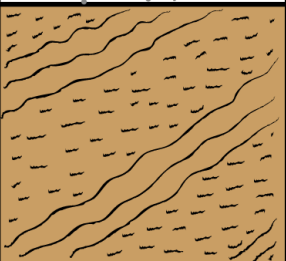
Su entorno natural, así como su geología han sido ampliamente estudiados desde el siglo XIX por diferentes autores como: Mather (1843), Cozzens (1848), Dana (1880), Merrill (1890), Kemp (1897), Lowe (1959), Ratcliffe (1968), Knowles (1969) (Todos en Merguerian, 1996), entre otros. En general, en las cercanías de la ciudad, se presentan rocas que van desde el Proterozoico hasta el Pleistoceno, que evidencian una evolución geológica variable y compleja: desde rifts, volcanismos de arco y procesos de metamorfismo; hasta glaciaciones recientes.

Sin embargo, aunque la geología propia sobre la que se encuentra el área metropolitana de Nueva York con sus cinco distritos es variable, la geología de la isla de Manhattan es relativamente homogénea y parece guardar una estrecha relación con los grandes edificios que se construyen y el aspecto en general de la ciudad.



**Figura 31.** Localización de la ciudad de Nueva York, específicamente el distrito de Manhattan (Global Mapper 18.2).

La estratigrafía de la isla está conformada por un basamento metamórfico del Proterozoico, correspondiente al Gneiss Fordham; suprayacido por cuarcitas del Cámbrico (Merril, 1898), sobre las que descansa el Mármol Inwood, del Ordovícico (Fisher et al., 1970). Finalmente, la secuencia es culminada por el Esquisto de Manhattan, el cual, es subdividido en tres unidades sobre las cuales se erigen la totalidad de los edificios y construcciones de gran magnitud (Fig. 32).

PALEOZOICO	Ordovícico	Medio		Esquisto de Manhattan: Subdividido en 3 unidades que varían de facie de Cianita a Silimanita. (Merguerian & Baskerville, 1987).
		Temprano		Marmol Inwood: Anteriormente mapeado como caliza.
	Cámbrico			Cuarzita Lowerre: Aflora en las cercanías de Yonkers.
PRECÁMBRICO	Proterozóico Medio			Gneiss Fordham: compuesto por biotita, hornblenda, granates y cuarzo.

**Figura 32.** Principales unidades rocosas en la isla de Manhattan y sus respectivas edades  
(Adaptada de Fisher et al., 1970 y Merguerian y Baskerville, 1987).

El Esquisto de Manhattan está subdividido en tres unidades tectonoestratigráficas diferenciadas en un complejo estructural, que varían de grado de Cianita a Silimanita (Merguerian & Baskerville, 1987 y Merguerian, 1996):

- La unidad estructural más baja aflora en la parte norte de Manhattan y al este de Bronx. Se caracteriza por su grado de meteorización, el cual le da una apariencia oxidada. Tiene un aspecto masivo de grano fino a medio, y se clasifica como un esquisto con presencia de moscovita, biotita, cuarzo, plagioclasa, cianita, silimanita y granate. Se encuentra intercalado con capas

que varían en espesor de calcita y mármol, y suprayace el Mármol Inwood. Su edad data del Ordovícico Medio.

- La parte central de la unidad es el cuerpo más extenso y común en la isla, por lo que comúnmente se le conoce como el clásico Esquisto de Manhattan. Aflora principalmente en el Central Park y presenta una coloración marrón oxidada. Se clasifica como un gneiss de grano medio a grueso conformado por biotita, moscovita, plagioclasa, cuarzo, granate, cianita y silimanita; aunque en algunos sectores presenta una textura esquistosa. Se caracteriza también por presentar intercalaciones con capas y lentes de granofels cuarzosos y anfibolitas ricas en cianita, silimanita, cuarzo y magnetita (Fig. 33).
- La parte superior de la unidad es principalmente de coloración grisácea, de grano fino a medio con bandas bien definidas de moscovita, cuarzo, biotita, plagioclasa, cianita y granates. Su textura varía entre gnéisica y esquistosa, y presenta intercalaciones con granofels y anfibolitas, lo que en conjunto posiblemente representa el metamorfismo de shales oceánicos interestratificados con areniscas, cherts y rocas volcánicas. Conforman la margen oeste y la mitad sur de Manhattan y el este del Bronx.

En cuanto al aspecto estructural, el Esquisto de Manhattan y los otros cuerpos que conforman la isla, han experimentado una evolución estructural que puede sintetizarse de la siguiente forma: un primer episodio que representa tres fases superpuestas de deformación, seguido de tres o más episodios de crenulación y plegamiento. En conjunción, la unidad del Esquisto de Manhattan está truncada por una zona de cizalladura dúctil denominada cabalgamiento de St. Nicholas y se encuentra también en contacto fallado con la formación Hartland a través de la línea de Cameron; la cual representa una antigua zona de sutura derivada de la orogenia Taconica (Merguerian, 1983 y Merguerian, 1996).





**Figura 33.** Esquisto de Manhattan aflorando en Central Park. Nótese el grado de foliación y el marcado bandeamiento. Es sobre esta roca que se edifican la mayoría de los rascacielos en Manhattan (Foto archivo personal).

Comúnmente, se ha considerado al Esquisto de Manhattan como la roca ideal para asentar grandes rascacielos, dada sus características geomecánicas, sumado al hecho de que la actividad sísmica en Manhattan y en general en la costa este de los Estados Unidos es bastante inusual y de poca magnitud. Como lo menciona Merguerian (1996), Las rocas base de Nueva York siempre se han considerado como cuerpos sólidos y resistentes a la actividad sísmica. Sin embargo, no se puede desconocer que dichos cuerpos se encuentran afectados por una serie de fallas que ocasiona que la ciudad se asiente sobre bloques delimitados por las mismas. Por lo tanto, existe una discusión sobre la falta de evidencia de sismos ocasionados por las fallas presentes. Lo que ha llevado a pensar que las fallas en la roca base solo



experimentan movimientos a grandes profundidades sin ninguna implicación en la geología superficial.

Es importante recalcar, a parte de las discusiones suscitadas por los especialistas, que indudablemente el aspecto general de Manhattan, así como su auge inmobiliario de grandes edificios, y por qué no, hasta su desarrollo económico, se deben en gran medida al sustrato específico, que tiene condiciones particulares, como lo es el Esquisto de Manhattan. Y aunque esto parece evidente en la realidad, y en el conocimiento casual de los neoyorquinos, hay autores, como Barr & Tassier (2009), que argumentan que la distribución de los grandes edificios poco o nada tiene que ver con la geología superficial.

Manhattan alberga dos centros de negocios importantes, donde generalmente se localizan los edificios más altos. Dichos distritos se conocen como el *Downtown* y el *Midtown* (Fig. 34). El conocimiento general dicta que dichos centros se aglomeraron de esta forma, puesto que eran los lugares donde la roca estaba más cerca de la superficie, factor muy importante para abaratar costos y simplificar las cimentaciones. Sin embargo, Barr & Tassier (2009) en su estudio sobre la localización de los grandes edificios en la isla, entre 1890 y 1915 (Época de auge económico e inmobiliario), concluyen que la distribución de los mismos obedece a efectos de cercanía de servicios ya previamente establecidos, así como agrupamiento y proximidad con socios estratégicos y comerciales. Relegando el aspecto de la profundidad de la roca a un segundo plano; en parte porque las excavaciones para llegar al nivel deseado rara vez representaban un incremento mayor al 7% del costo total del proyecto, particularidad que en Nueva York, y específicamente en Manhattan, representa una nimiedad en cuestiones monetarias.



**Figura 34.** Distribución de los dos centros donde se concentran los grandes edificios en Manhattan. El de la parte superior denominado *Midtown* y el inferior, conocido como *Downtown*. Nótese la aparente escases de edificios altos en el centro (URL: <https://www.quora.com/Why-is-Manhattans-distribution-of-skyscrapers-so-uneven> [31.05.2017]).

De esta forma se evidencia una creencia falsa entre los neoyorquinos, donde se pensaba que la roca fuerte se presentaba en dos puntos concretos, y entre estos, la roca era profunda y no muy adecuada para albergar grandes construcciones, formando así una distribución urbana con dos grandes centros, y un “valle” de edificios de gran altura entre estos dos puntos. Sin embargo, este aspecto no entra en conflicto con la idea expresada anteriormente, donde es evidente que el esquivo de Manhattan ha jugado un papel preponderante para darle el aspecto icónico actual que tiene la ciudad. Inclusive, los autores Barr & Tassier (2009) mencionan en su escrito que el terreno siempre ha representado un papel preponderante para

seleccionar el lugar donde se construirá una ciudad. Igualmente, mencionan que el aspecto geológico, aunque sea relegado a un segundo plano, es de igual importancia, puesto que juega un rol significativo en la distribución espacial de las actividades económicas. Así mismo, concluyen que el aspecto geológico puede impulsar aglomeraciones económicas, o por el contrario, sectorizar o apartar las mismas por efectos de barreras naturales.

La geología propia de la isla pudo no haber incidido en la distribución espacial de los edificios, pero claramente, el Esquisto de Manhattan si condicionó la construcción de grandes rascacielos para maximizar el poco espacio disponible en Manhattan. Lo que lleva a pensar que hay una conjunción de elementos geológicos y geomorfológicos, que dan origen a una identidad urbana muy particular. Estos elementos están representados por un sustrato adecuado para soportar grandes cargas y un espacio vital urbanizable relativamente escaso. Además, si a lo anterior se le agrega el hecho de que la ciudad de Nueva York se encuentra en una margen continental pasiva, donde la amenaza por efectos sísmicos es baja, encontramos entonces una sumatoria de características geológicas que condicionan por completo la concepción de ciudad, y por supuesto, la influyen de tal forma que le proporcionan un aspecto y una identidad única fácilmente reconocible.

## **6. Geología urbana, una aproximación moderna**

Como se ha tratado en el capítulo anterior, el concepto de geología urbana parece estar presente en la humanidad desde hace mucho tiempo atrás. Sin embargo, aquellos que lo ponían en práctica lo hacían por instinto o de manera empírica, sin llegar a cuestionar su verdadera naturaleza o siquiera pensar en una definición para la naciente idea que estaban ejecutando. El concepto ha evolucionado al paso que se transforman las grandes urbes y la sociedad avanza en dirección de nuevos estilos de vida cada vez más humanizados que buscan el confort y la seguridad del individuo.

El término Geología Urbana irrumpirá tímidamente en las discusiones de urbanistas y geólogos a comienzos del siglo XX. Y buscará llevar más allá el entendimiento que tenemos sobre nuestras ciudades, con el fin de esclarecer el papel que juega el entorno natural en la creación y configuración de las mismas.

### **6.1 El nacimiento de una nueva rama de la geología**

Las palabras geología y urbanismo o ciudad son difíciles de asociar, dada su naturaleza diametralmente opuesta. Anteriormente se tenía el concepto que las áreas urbanas eran lugares pobres e inadecuados para llevar a cabo la labor geológica (Walton, 1982). Sin embargo, este concepto ha ido cambiando a lo largo del siglo XX, gracias a un proceso integrativo entre la planeación y administración urbana con las ciencias aplicadas, sociales y de la tierra, especialmente la geología ambiental.

Las primeras menciones de la geología sobre la que se establecía una zona urbana datan de principios del siglo XX, cuando H. M. Ami (1900) publica su trabajo sobre la geología en la que se asientan ciertas ciudades del este de Canadá, titulado: *On the Geology of the principal cities in easter Canada*. Este documento muestra una primera aproximación entre la relación del entorno urbano con la geología que lo rodea, sin embargo, no explora más allá, y simplemente se limita a describir los cuerpos rocosos y las características geológicas de la región.

El concepto geológico estaría ausente en la planeación urbana hasta después de la Segunda Guerra Mundial. Es en la posguerra, después de ver gran parte de sus ciudades y campos destruidos, que los alemanes deciden reconstruir sus ciudades, siguiendo parámetros de ordenamiento y distribución de los centros urbanos de acuerdo a las características particulares del suelo (Hageman, 1963 y Legget, 1973). Debido a esto, surgen los primeros mapas donde se aprecia una relación clara entre las características geológicas del entorno y el desarrollo urbano. En las décadas subsiguientes, otros países europeos y americanos seguirán con estas prácticas, en parte gracias al discurso desarrollista impuesto en la década de los 50, donde ahora las materias primas son esenciales para el crecimiento económico, y la forma como estas llegan e interactúan con las ciudades comienza a ser un tema de discusión central.

El crecimiento de las urbes a partir de la década del 50 aumentará el interés en la planeación y administración de las mismas. Igualmente, el aumento de la calidad de vida, sumado a los avances técnicos, empujarán el crecimiento de la población y la llevarán a asentarse en áreas urbanas, llegando así a representar un 70% de la población mundial. De esta forma, empieza a germinar un concepto que será recogido y acuñado formalmente por Legget en 1973: Geología Urbana. Término que expondrá principalmente en su escrito: *Cities and Geology*, y posteriormente lo difundirá a lo largo de múltiples simposios y presentaciones en las décadas subsiguientes.

A grandes rasgos, aunque no de manera implícita, Legget define la geología urbana como una rama de la geología que se encarga de aplicar el conocimiento geológico a la ayuda de la planificación y administración de áreas urbanas, apoyándose en diversas áreas del conocimiento en ciencias de la tierra, como la hidrogeología, la geotecnia y la ingeniería para estudiar los procesos geológicos y como estos interactúan con las dinámicas urbanas. De acuerdo a esto, surge un entendimiento más universal de la ciudad como un ente sumamente complejo que demanda y desecha recursos, y se volverá un tema de discusión trascendental en la comunidad

geológica, lo que llevará a la geología urbana a conformar una parte importante de la geología ambiental moderna.

Paralelamente, surgirán otras ramas del conocimiento que complementarán la geología urbana. Una de ellas es la geomorfología urbana, que se encarga de estudiar al hombre como agente de cambio superficial, que transforma el terreno natural con el propósito de adaptarlo y “antropogenizarlo” (Bathrellos, 2007). Y otras más modernas como la geomedicina, la cual se ocupa de analizar las potenciales amenazas para la salud de un individuo o población derivadas de factores naturales externos presentes en el ambiente (Låg, 1990).

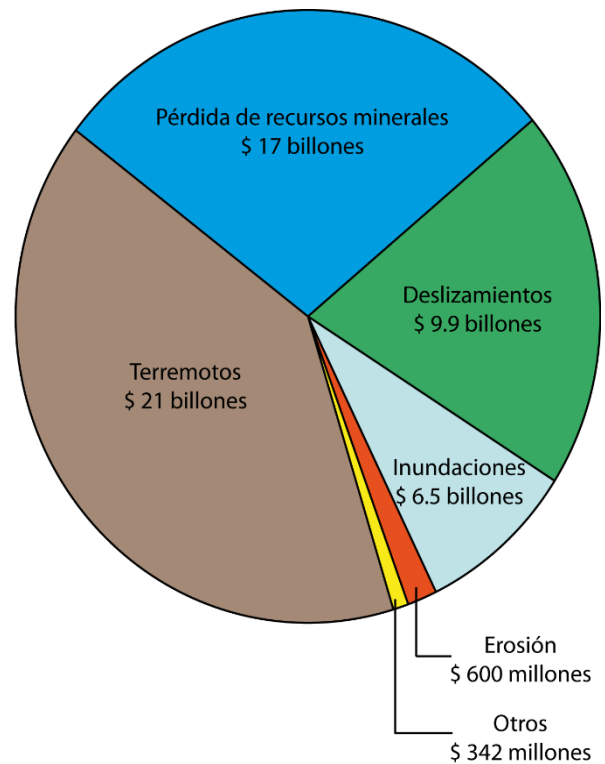
Un primer acercamiento al concepto trabajado sobre una problemática real se llevaría a cabo por la división de minas y geología de California en los años 70, en el documento *Urban Geology: A Master Plan for California* (California Division of Mines and Geology, 1973). En este informe, el Estado de California, detalla claramente cuáles son las principales problemáticas geológicas que inciden sobre los centros urbanos, y calcula las posibles pérdidas humanas y económicas que pueden llegar a ocurrir hasta el año 2000, si no se modifican ciertas prácticas que deterioran el entorno.

Como se evidencia en el documento, dichas pérdidas se calculan en más de 55 billones de dólares y están principalmente relacionadas con factores geológicos de gran magnitud, como los terremotos (bastante comunes en el centro de California), los deslizamientos, las inundaciones, la erosión, entre otros (Fig. 35). Lo interesante de esta primera aproximación práctica es la preocupación, llevada a efectos económicos, que pueden significar ciertos aspectos netamente geológicos muy típicos de la región, y como estos son identificados y analizados, para ser mitigados o reducidos en un espacio de tiempo.

En este sentido, se está cuantificando de cierta forma los aspectos geológicos propios con los cuales deben convivir los californianos. Y esto no solo en términos de amenazas, ya que también se consideran factores que aportan un potencial

económico y de desarrollo a la región, como lo son los recursos minerales y los suelos.

Problemas geológicos	% Total pérdidas
Terremotos	38
Pérdida de recursos minerales	30
Deslizamientos	18
Inundaciones	12
Actividad erosiva	1
Suelos expansivos	0.3
Desplazamiento de fallas	0.15
Amenaza volcánica	0.1
Amenaza tsunami	0.1
Subsidencia	0.05



**Figura 35.** Principales problemas geológicos proyectados en California entre 1970 y 2000. Se muestra el porcentaje de pérdidas que implican y su equivalente en dólares. Adaptado de: California Division of Mines and Geology (1973).

Posteriormente, el estudio plantea una metodología para categorizar los tipos de problemas geológicos y su posible solución o reducción a través del tiempo. De acuerdo a esto, la solución o mitigación de los problemas debe ser analizada bajo la óptica de alguna de estas dos categorías:

- Problemas que se pueden resolver mejorando o avanzando en el estado del arte de la ciencia a través del desarrollo de nuevas herramientas o habilidades.
- Problemas cuya solución puede ser factible si se extiende la aplicación de conocimientos o procedimientos actuales (para la época).



Adicionalmente, el informe propone que la solución a cada uno de los problemas, sin importar a cuál de las dos categorías pertenezca, debe seguir una sucesión de pasos para estudiar el problema, entenderlo y posteriormente buscarle una solución viable:

1. Reconocer la naturaleza, extensión y severidad del problema.
2. Vislumbrar posibles soluciones factibles al problema.
3. Preparar planes de contingencia para mitigar o controlar los posibles problemas que no tenga pronta solución o una solución definitiva.

Este primer acercamiento teórico fue de gran importancia para esta nueva rama del conocimiento, pues demostró una nueva forma de ver y entender el entorno geológico y todas las posibles consecuencias que se pueden desprender de él. Así mismo, se demostró que dichas consecuencias se pueden medir y cuantificar, en aspectos económicos, y más importante aún, en vidas humanas.

La pregunta que surge a continuación es ¿Cuáles de estos pronósticos fueron acertados para el año 2000? Si se realiza una revisión minuciosa de los casos presentados en California hasta el comienzo del siglo XVI, se puede concluir que la mayoría de las problemáticas identificadas en el documento ocurrieron y fueron pronosticadas de una manera acertada, siendo los terremotos el factor más dañino del siglo pasado con más de 150 eventos con una magnitud igual o superior a 5.5 en la escala de Richter (Fig. 36).

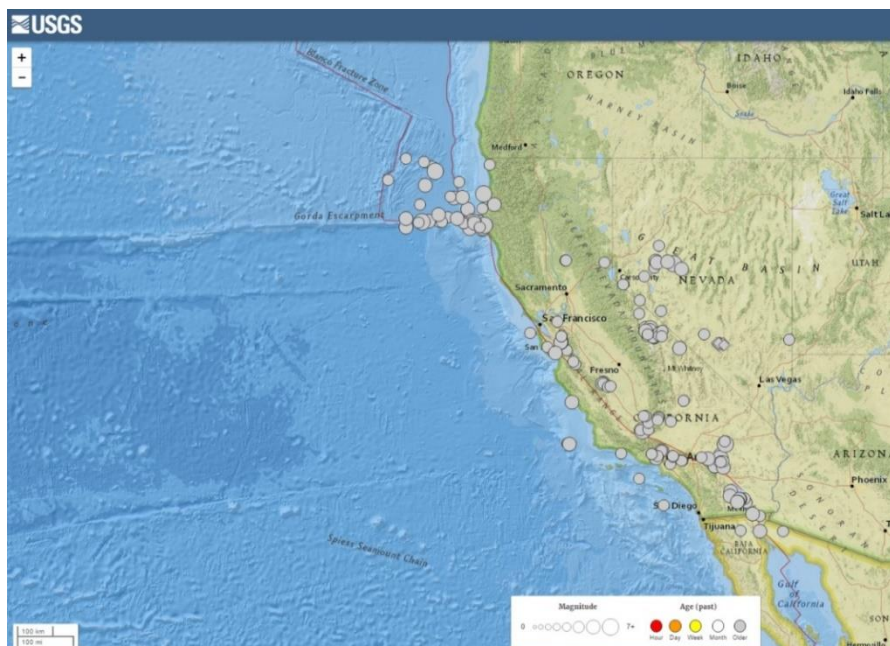
Sin embargo, otros factores como las sequías y los incendios no fueron acertadamente pronosticados, y al día de hoy, representan importantes amenazas para la vida y las propiedades de los californianos. El hecho de que dichos efectos no se hayan cuantificado de forma tan acertada como las otras problemáticas, puede deberse al impacto del cambio climático en la región; situación que no se tuvo en cuenta en la década de los 50, cuando se preparó el informe.

La incidencia de las sequías en los últimos años se ha convertido en un problema de primer orden para el gobierno de California, puesto que encarna numerosas

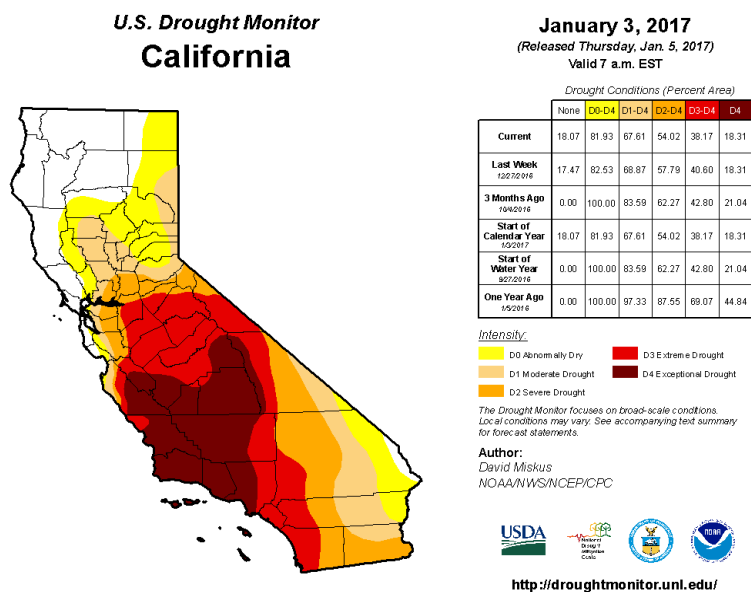
pérdidas económicas representadas por afectación de cultivos, la degradación del suelo, y el incremento del riesgo en la ocurrencia de incendios. Al comienzo del año 2017, los niveles de sequía en el centro del estado han alcanzado el estatus de excepcionales según el *United States Drought Monitor* (Fig. 37).

Con la llegada de las décadas de los 80 y 90, la geología urbana se expandiría a nuevos horizontes. La consolidación de la geoquímica y la geofísica, que experimentan grandes avances técnicos durante estas décadas, impulsará la creación de mapas más estructurados, donde cada vez se acogen y relacionan más variables. Conforme a esto, se empiezan a realizar mapas en diferentes ciudades, donde se exponen los casos particulares y puntuales de cada una (Bathrellos, 2007). Algunos ejemplos observados son la subsidencia y conflictos del suelo en Holanda (De Mulder et al., 1994); los impactos de la erosión y la sedimentación sobre las áreas urbanas (Douglas, 1988 en Bathrellos, 2007 y Douglas, 1990); y la relación entre los deslizamientos y las pendientes con el crecimiento de Kuala Lumpur (Tan, 1987a en Tan, 2006), así como uno de los primeros casos de estudio, llevados a cabo en la misma ciudad por Tan (1987b) y Tan (2006).

La celebración de la Cumbre de Río en 1992, despierta el interés de ciertos organismos internacionales, como la UNESCO, los cuales comienzan a explorar el concepto de geología urbana como una posible solución a los problemas ambientales y al crecimiento descontrolado de las grandes urbes. De esta forma, el termino y la naciente rama obtendrían cierto reconocimiento a nivel mundial y empezarían a ser vistas como una futura solución a los problemas que vendrían con el nuevo milenio, especialmente en los lugares donde ocurrían grandes procesos migratorios y cambios demográficos, como África, Sur América y el Este de Asia (UNESCO, 1997).



**Figura 36.** Terremotos con una magnitud igual o superior a 5.5 en la escala de Richter registrados en el estado de California y parte de Nevada entre los años 1950 a 2000 (URL: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map/> [03.01.2017]).



**Figura 37.** Niveles de sequía (intensidad) en el estado de California a comienzos del año 2017. (URL: <http://droughtmonitor.unl.edu/> [03.01.2017]).

Posteriormente, con el desarrollo de los sistemas de información geográfica (SIG) se da una revolución en todos los campos de la geología, facilitando la presentación, manejo y relación de la información mediante el uso y sobreimposición de capas (Bathrellos, 2007). Igualmente, el avance en las tecnologías de la comunicación facilita el acceso a la información, permitiendo que el concepto llegue cada vez a más personas y sea difundido o aplicado por diferentes instituciones.

Sin embargo, sesgadamente, la geología urbana actual se ha enfrascado en el estudio de casos particulares de cada ciudad, dejando un poco de lado esa intención de herramienta para la planeación urbana por la que fue concebida inicialmente. Los países europeos, del sureste asiático, así como Estados Unidos y China son los principales exponentes en cuanto a materia de estudios en la actualidad, siempre enmarcados en el ámbito de la geología ambiental y la ingeniería geológica. Y no solo esto, ciertas escuelas de geología ofrecen cátedras de geología urbana bajo una óptica totalmente distinta y un poco superficial y alejada del verdadero potencial que puede llegar a alcanzar. Dichos cursos están enfocados a estudiar los materiales rocosos que componen los principales edificios y monumentos de una ciudad en cuestión, para así tener una idea somera del sustrato geológico en el que se encuentra el desarrollo urbano (Fig. 38). Dicha aproximación es sumamente superflua y sesgada, y falla en integrar diversos aspectos como la planificación urbana en relación con un entendimiento resiliente con el ambiente, así como la posibilidad de potencializar las características únicas del terreno para adaptar y dar identidad propia a una ciudad.

En este sentido, es imperativo reconocer que el término está siendo tergiversado, por lo tanto, es necesario dar a entender el alcance real de esta ciencia mediante una definición adecuada que explique y delimite los verdaderos intereses y objetivos que busca estudiar.



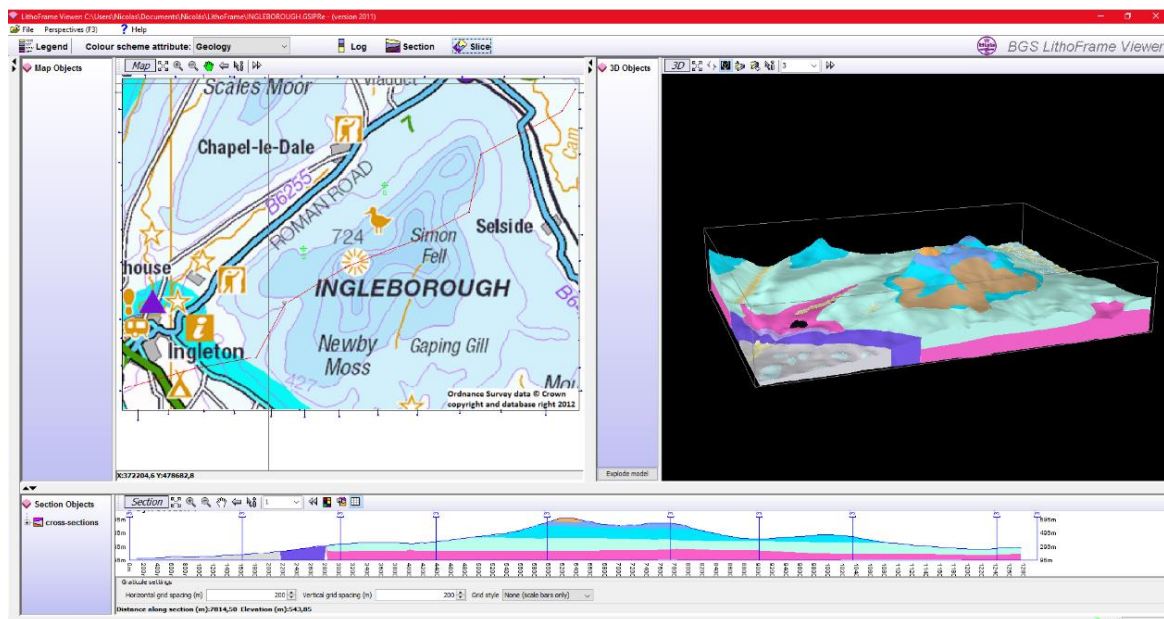
**Figura 38.** Estudiantes en un curso de campo de geología urbana observando los materiales constructivos y su naturaleza geológica (URL: <http://earthmagazine.org/article/urban-geology-emerging-discipline-increasingly-urbanized-world> [9.06.2017]. Crédito: Callan Bentley).

Sin embargo, no todos los esfuerzos por difundir correctamente el concepto han sido en vano o han caído en prácticas distorsivas. El British Geological Survey (BGS), uno de los más prestigiosos del mundo en geociencias, y otras entidades británicas, han hecho enormes avances para empoderar al ciudadano común a través de la difusión y acceso a la información en materia de temas geológicos con aplicaciones urbanas.

Desde la década de los 90, la municipalidad de Londres ha puesto en marcha proyectos ambiciosos como el LOCUS (London Computerized Underground and Surface), el cual se encarga de monitorear en tiempo real la superficie y el subsuelo, para producir mapas geológicos urbanos como herramientas para la planeación, la predicción de costos y la solución de problemas geoambientales, apoyado en una base de datos debidamente georreferenciada de más de 20.000 perforaciones (De Mulder, 1996 en Bathrellos, 2007).

El BGS, igualmente ha lanzado ciertas aplicaciones que se aprovechan de las nuevas tecnologías de la comunicación y la portabilidad y capacidad de los nuevos dispositivos móviles, para promover la expansión de la información a cargo de los mismos usuarios, que no necesariamente tienen una base académica en las ciencias de la tierra y ambientales. Algunos ejemplos de esto corresponden a aplicaciones para teléfonos inteligentes que permiten observar los diferentes tipos de suelos y sus propiedades; u otras aplicaciones que permiten reportar en tiempo real un evento geológico determinado, como deslizamientos, inundaciones, avenidas torrenciales, etc.; con la finalidad de prevenir y dar a conocer a un grupo de personas más amplio los fenómenos geológicos que ocurren en las islas británicas.

El BGS también ha creado un software denominado LithoFrame Viewer, con el cual el usuario puede observar el terreno y sus divisiones litológicas en diferentes formas: ya sea a manera de perfil, en un *render*, o de manera más clásica, en forma de mapa; todas en tiempo real. Ofreciendo de esta manera un acercamiento sencillo, fácil de usar y atractivo visualmente para aquellas personas que no están familiarizadas con mapas o con el uso de sistemas de información geográfica (Fig. 39).



**Figura 39.** Interface del software LithoFrame Viewer del BGS, donde, de un solo mapa se puede visualizar el terreno en tres dimensiones y perfiles de elevación y el subsuelo (NERC 2006 – 2011).

## 6.2 Aproximaciones de la Geología Urbana en Colombia

En el caso colombiano los esfuerzos por describir y documentar el entorno natural y geológico de las principales ciudades ha sido amplio, sin embargo, los intentos por unificar y exponer bajo una misma mirada todos los efectos y problemas asociados al entorno donde se localizan las urbes han sido muy pobres y casi inexistentes. Generalmente, los especialistas se centran en explicar y resolver los problemas que les conciernen a su interés particular, sin explorar más allá las posibles conexiones que se generan por la interacción de todos los sistemas participantes en un entorno natural real. La geología ambiental es utilizada en la planificación de las ciudades colombianas, sin embargo, solo se ocupa de los problemas asociados a la atención y prevención de desastres, y omite la aplicación y conjugación de disciplinas relativamente nuevas como la geomedicina y la misma geología urbana.

Algunos autores como Hermelin (2007) y Hermelin et al. (2010) han tratado de reunir diferentes especialistas en diversas áreas para describir desde diferentes puntos de vista el entorno en que se asientan nuestras ciudades. Sin embargo, dicho ejercicio



se ha quedado en el ámbito descriptivo, y no ha logrado evolucionar hacia una metodología o un paradigma del conocimiento que dicte la forma o los procedimientos que se deben tener en cuenta a la hora de planificar las ciudades para que estén en equilibrio con el entorno natural que ocupan.

Usualmente el término geología urbana en Colombia (y gran parte de Suramérica) está ampliamente asociado a la atención y prevención de desastres, pues es el conflicto geológico más fácilmente identificado en una ciudad. Muchas veces, los autores fallan al considerar una única relación entre la geología y el entramado urbano, dándole generalmente una connotación negativa; sin considerar que la geología dicta patrones de expansión o desarrollo, genera oportunidades económicas que dan dinamismo, provee protección o efectos positivos en la población, o también sentencia la identidad misma de la urbe, confiriéndole rasgos únicos que la hacen prospera o, por el contrario, la condenan al estancamiento.

## **7. El concepto unificado de geología urbana**

La ciudad es quizás el invento más grande que ha formulado la humanidad. Allí se reúnen las vidas, los sueños, las ilusiones y las experiencias de millones de personas alrededor del planeta. Son el motor del mundo, pues agrupan la vastedad de la creatividad humana.

La ciudad se desarrolló para aglomerar individuos que han evolucionado para vivir en grupo, con la finalidad de proveer una seguridad ante agentes externos naturales que representan una potencial amenaza para el hombre. También como un efecto de cercanía e inmediatez, a todas las cosas desarrolladas por él mismo que le han encaminado a un modo de vida totalmente antropocéntrico, lejos de las agrestes condiciones naturales.

La ciudad irá avanzando conforme avance la humanidad, pues es parte de su naturaleza social y representa en gran medida su anhelo evolutivo de seguir adelante, adaptándose a los cambios externos que vienen impuestos desde afuera. Es por esto que la ciudad es y seguirá siendo un foco de estudio principal, cuyo interés debe ser acogido tanto por especialistas como el ciudadano común. Con el avance de la ciencia y la tecnología, surgirán cada vez más elementos y conceptos que ayudarán a moldear las urbes del futuro, y es aquí donde la geología urbana puede jugar un papel fundamental en la nueva concepción de ciudad como un sistema conjugado que sustenta y respeta el entorno natural. Sin degradar las condiciones y estándares de vida a los que estamos acostumbrados.

En los capítulos anteriores se ha hecho una extensiva revisión del concepto, desde su concepción y aplicación empírica, hasta su definición y delimitación moderna en el siglo XX. Sin embargo, pienso aún, que el concepto es desligado y apartado de otras ciencias, lo que ocasiona que sea relegado y poco difundido en ciertas partes del mundo, en especial el trópico y los países similares, antiguamente denominados subdesarrollados.

Este capítulo expone una visión más unificada de la geología urbana, y como esta debe ser asociada y acogida por otras disciplinas en una búsqueda común en pro del desarrollo humano.

## **7.1 Geología urbana**

La geología urbana debe ser una rama del conocimiento entrelazada y desarrollada a la par de la geología ambiental. Donde se evidencie, como los procesos urbanos y las dinámicas humanas se correlacionan con los aspectos geológicos y geomorfológicos sobre los que evolucionan y actúan directamente. De esta forma, la geología urbana debe abarcar y considerar los aspectos urbanos, humanos, sociales, económicos, ambientales y políticos. Buscando conjugar dichas temáticas sobre una misma línea de desarrollo, que potencialice y aproveche los aspectos geológicos y geomorfológicos de la manera más adecuada, preservando en mayor medida, las características naturales y mitigando los posibles riesgos que puedan surgir como consecuencia de un mal entendimiento de los fenómenos descritos previamente.

Igualmente, la geología urbana debe explorar las características particulares que dan identidad a una ciudad, derivadas propiamente de los fenómenos geológicos y superficiales sobre los que se asienta.

La base teórica de la geología urbana es el estudio geológico-urbano, el cual debe estar enfocado en visualizar y analizar todas estas dinámicas en un mapa, o un conjunto de mapas, que evidencien la evolución de la dualidad geológico-urbana a través del tiempo. Evaluando los sucesos pasados, visualizando el momento actual, y con base en esto, planificar, simular y predecir los posibles eventos futuros.

Sin embargo, la posibilidad de visualizar y confrontar todos los aspectos que intervienen en la dualidad geológico-urbana es significativamente compleja, dada la cantidad de variables. Para tener un panorama más amplio y general, es necesario desglosar en una primera instancia cuales variables geológicas tienen mayor relación o están incidiendo de una manera más directa en la naturaleza urbana.

Para su facilidad, es necesario la aplicación de un nuevo concepto: Los Indicadores Geológico-Urbanos (I. G. U.). Este concepto parte de los Geoindicadores definidos por Gupta (2002), en su artículo *Geoindicators for Tropical Urbanization*. Donde el autor propone una serie de aspectos geológicos imperativos que deben ser tenidos en cuenta para llevar a cabo un desarrollo sostenible en las ciudades ubicadas en el trópico. Dichos aspectos son generalmente de carácter ambiental y representan una seria amenaza natural si no son comprendidos o tenidos en cuenta.

El concepto de I. G. U. propuesto pretende abarcar más allá de los aspectos ambientales y propone relacionar, mediante una matriz cruzada, la importancia e incidencia que tienen los aspectos geológicos y geomorfológicos en todos los aspectos urbanos conocidos, desde lo poblacional, hasta la percepción estética del paisaje; dirigiendo el análisis desde lo macro hasta lo micro tanto en el ámbito geológico como en el entorno urbano (Fig. 40). El análisis preferiblemente debe ser llevado a cabo en el tiempo presente, para estudiar la situación actual que compromete al caso en cuestión y establecer una línea base. Sin embargo, dada la naturaleza de los indicadores (tanto geológicos como urbanos), el análisis cruzado puede efectuarse para un evento pasado, el cual servirá como parámetro para medir la evolución del entorno; o establecerse el escenario futuro hipotético, con lo cual, el estudio tomará un carácter predictivo y servirá como una medida de planificación a largo plazo.

El análisis de las variables se realiza mediante una calificación cualitativa asignada por el grupo multidisciplinario que estudia el caso. De esta forma se utiliza una escala de 0 a 4 (Siendo 0 una relación nula y 4 una muy alta relación) para identificar que tanta relación o incidencia hay por parte de los componentes geológicos/geomorfológicos sobre los aspectos urbanos.

Los indicadores geológico-geomorfológicos encausaran el análisis desde escalas macro, de orden global o continental, hasta escalas micro, más detalladas, donde se traten aspectos locales y puntuales. De esta forma, se iniciará el estudio revisando aspectos como: Marco tectónico (inmediato) sobre el que se asienta la

población; los posibles efectos que tengan un eventual cambio climático global o regional sobre el entorno geográfico; así como la geología regional y la geomorfología sobre la que se asientan fundamentalmente la ciudad o población en estudio. Es imperativo destacar que estos dos últimos temas, así como otros que se abordaran más adelante, son sumamente extensos y abarcan una cantidad de subtemas, los cuales son revisados uno a uno dentro de la matriz cruzada (Fig. 41).

Posteriormente, el estudio conlleva a tener en cuenta aspectos de una escala intermedia o regional, con temáticas como la hidrogeología y la geología ambiental. Destacando subtemas como corrientes superficiales, aguas subterráneas y calidad del agua en el ámbito hidrogeológico; además de apartados como: riesgos geológicos, desechos, materiales de construcción y consumo en la temática ambiental.

Finalmente, entrando en terreno de escalas más locales, se deben abordar temas como la geotecnia, donde se consideren los suelos aptos para la urbanización y las cimentaciones; y la geomedicina, rama relativamente nueva de la geología ambiental, para tratar aspectos relacionados con riesgos a la salud derivados de la naturaleza física o química de los cuerpos geológicos.

El último apartado de la matriz en aspectos geológicos y geomorfológicos está reservado para aquellas características únicas, propias o puntuales que de una u otra forma terminan definiendo o dando una identidad a una ciudad. Este aspecto es sumamente importante, como se ha recalcado a lo largo de todo el escrito, pues dichas características puntuales pueden gobernar, hasta cierto punto, la dinámica de una urbe: desde aspectos poblacionales, como su distribución o migración, hasta aspectos económicos, de transporte, ambientales e incluso, sociales.

INDICADORES GEOLÓGICO-URBANOS	
Geología/Geomorfología	Urbanos
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Marco tectónico.</li> <li>- Cambio climático.</li> <li>- Geología regional. <ul style="list-style-type: none"> <li>- Geología general.</li> <li>- Estratigrafía.</li> <li>- Geología estructural.</li> </ul> </li> <li>- Geomorfología. <ul style="list-style-type: none"> <li>- Estructuras regionales.</li> <li>- Estructuras locales. <ul style="list-style-type: none"> <li>- Drenajes.</li> <li>- Tipos de laderas.</li> <li>- Pendientes.</li> <li>- Vertientes.</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>- Hidrogeología. <ul style="list-style-type: none"> <li>- Corrientes superficiales.</li> <li>- Aguas subterráneas.</li> <li>- Reservorios.</li> <li>- Calidad del agua.</li> </ul> </li> <li>- Geología ambiental. <ul style="list-style-type: none"> <li>- Riesgos geológicos y otros. <ul style="list-style-type: none"> <li>- Inundaciones.</li> <li>- Vulcanismo.</li> <li>- Sismicidad.</li> <li>- Avenidas torrenciales.</li> <li>- Lluvias.</li> <li>- Deslizamientos.</li> <li>- Hundimientos.</li> <li>- Incendios.</li> <li>- Sequías.</li> </ul> </li> <li>- Materiales de construcción y consumo.</li> <li>- Desechos.</li> </ul> </li> <li>- Geotécnica. <ul style="list-style-type: none"> <li>- Cimentaciones.</li> <li>- Suelos.</li> </ul> </li> <li>- Geomedicina. <ul style="list-style-type: none"> <li>- Efectos peligrosos derivados de la geología.</li> <li>- Enfermedades asociadas a la geología.</li> <li>- Riesgos de salud derivados de la geología.</li> </ul> </li> <li>- Aspectos muy característicos de la geología o la geomorfología que dan una identidad particular a la ciudad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Población. <ul style="list-style-type: none"> <li>- Crecimiento.</li> <li>- Densidad.</li> <li>- Migración.</li> <li>- Factores sociales y servicios.</li> </ul> </li> <li>- Uso de la tierra. <ul style="list-style-type: none"> <li>- Expansión.</li> <li>- Urbanización.</li> <li>- Uso industrial.</li> <li>- Protección.</li> </ul> </li> <li>- Economía. <ul style="list-style-type: none"> <li>- Base económica.</li> <li>- Necesidades económicas.</li> <li>- Oportunidades económicas.</li> <li>- Turismo.</li> </ul> </li> <li>- Transporte. <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tráfico y conexiones.</li> <li>- Transporte público.</li> </ul> </li> <li>- Ambiente. <ul style="list-style-type: none"> <li>- Clima.</li> <li>- Protección contra desastres.</li> <li>- Conservación de R. N.</li> </ul> </li> <li>- Política. <ul style="list-style-type: none"> <li>- Legislación.</li> <li>- Admón. Pública.</li> <li>- Participación ciudadana.</li> </ul> </li> <li>- Social y otros. <ul style="list-style-type: none"> <li>- Adaptación y modificación de los seres humanos sobre el terreno.</li> <li>- Defensa civil.</li> <li>- Relocación.</li> <li>- Valores estéticos.</li> </ul> </li> </ul>

**Figura 40.** Indicadores Geológico-Urbanos (I. G. U). Se presentan los principales temas, tanto en el ámbito geológico y geomorfológico como urbano, así como sus subdivisiones. Son estas unidades de temas y subtemas los que se utilizan en la matriz cruzada.

Caso de estudio:	
Proyección:	
Carácter:	

GEOLOGICOS/GEOMORFOLÓGICOS		URBANOS		Población		Factores sociales y servicios		Expansión		Uso de la tierra		Economía		Transporte		Ambiente		Política		Social y otros	
		Crecimiento	Densidad	Migración																	
Marco tectónico																					
Cambio climático																					
Geología regional	Geología general																				
	Estratigrafía																				
Geomorfología	Geología estructural																				
	Estructuras regionales	Escarpes																			
		Superficies de erosión																			
		Drenajes																			
		Tipos de laderas																			
Hidrogeología	Estructuras locales	Pendientes																			
		Vertientes																			
		Corrientes superficiales																			
		Aguas subterráneas																			
	Reservorios																				
Geología ambiental	Calidad del agua																				
	Riesgos geológicos	Inundaciones																			
		Vulcanismo																			
		Sismicidad																			
		Avenidas torrenciales																			
		Univias																			
		Deslizamientos																			
Hundimientos																					
Geotécnia	Materiales de construcción y consumo	Desechos																			
		Cimentaciones																			
Geología económica	Suelos	Minería - explotación																			
		Recursos minerales																			
Geomedicina	Enfermedades asociadas a la geología	Riesgos de salud derivados de la geología																			
		Aspectos particulares de la geología o geomorfología que dan identidad a una ciudad																			

Muy alta relación	4
Alta relación	3
Mediana relación	2
Baja relación	1
Sin relación	0

**Figura 41.** Estructura de la matriz cruzada donde se analiza que tanta incidencia tiene un indicador geológico/geomorfológico sobre un indicador urbano. Se presenta también la escala de calificación cualitativa, la cual está codificada por colores para facilitar la visualización de los cruces cuya relación es muy alta (rojo) o muy baja (blanco).



El contenido de la matriz puede ser variado o modificado según el interés profesional o propio del estudio en ejecución. Se incita inclusive a los investigadores a agregar campos nuevos de acuerdo a la situación particular de la ciudad en cuestión a estudiar. Por ejemplo, para el caso de una ciudad costera, vemos como las variables de geomorfología costera y geología marina (ausentes en esta tabla) serían de primer orden de importancia al abordar tendencias de desarrollo que pueden verse afectadas o aprovecharse debido estas dos grandes disciplinas mencionadas. Igualmente, las ciudades ubicadas en los trópicos se concentrarán en entender y analizar problemáticas derivadas propiamente de dichas latitudes, más relacionadas con el clima y los imperantes procesos erosivos; a diferencia de urbes localizadas en otras latitudes, donde los agentes climáticos y las variaciones estacionales llevan a concentrar los esfuerzos en otro tipo de dinámicas totalmente diferentes.

Es por esto que la matriz, y por consiguiente los mismos I. G. U. no deben ser tomados como unas directrices rígidas. Por el contrario, deben ser entendidos como una especie de guía base que conlleve al investigador a pensar y decretar cuales son los tópicos más adecuados a utilizar en su caso de estudio particular, hasta el punto donde pueda, inclusive, agregar u omitir indicadores, para de esta forma, tratar de simular el escenario más apegado a la realidad.

El aspecto urbano es de igual importancia dentro del estudio, por lo tanto, se le ha asignado una fila a parte para hacer los respectivos cruces con los temas geológicos y geomorfológicos. La profundidad de este aspecto también puede ser modificada de acuerdo a las necesidades. Por lo tanto, se invita ampliamente a los profesionales, expertos en temas urbanos y de desarrollo que aporten e intervengan en este fundamental aspecto.

Los indicadores urbanos abarcan temáticas sumamente amplias presentándose de igual forma en la matriz desde aspectos más globales (como población y economía), hasta temáticas más puntuales (transporte, turismo, estética urbana, etc.). Sin

embargo, el orden estricto de dichas temáticas puede ser alterado o reasignado según el criterio propio del experto en temáticas urbanas y sociales.

Dada esta dualidad, es de suma importancia hacer del estudio geológico-urbano un estudio multidisciplinario, donde intervengan profesionales de ciencias de la tierra, urbanistas, arquitectos, planificadores, ingenieros, políticos y dirigentes por igual. Otorgando de esta forma un carácter más universal que intente recopilar, en todos sus aspectos, las complicadas interacciones que germinan en cada uno de estos microcosmos particulares que denominamos ciudad.

## **7.2 Justificación de los I. G. U. propuestos para el estudio**

Como se ha mencionado en párrafos anteriores, los I. G. U. son la base fundamental propuesta para llevar a cabo el estudio geológico-urbano. La selección de estos indicadores se ha hecho de tal forma que puedan analizar las principales variables que intervienen en el desarrollo urbano.

### **7.2.1 Marco Tectónico**

Los indicadores geológico-geomorfológicos están encabezados por el marco tectónico, el cual dictamina a escala continental la situación geológica y los eventos a gran escala que inciden sobre la urbe. Este apartado es altamente variable y puede influir de diversas maneras: existen ciudades localizadas en marcos tectónicos relativamente tranquilos y sin variaciones a lo largo de grandes escalas de tiempo (márgenes pasivas, cratones interiores, escudos, etc.); pero también es posible encontrar desarrollos urbanísticos sobre marcos tectónicos sumamente complejos y variables en el tiempo (márgenes activas, rifts, estados de colisión, etc.) que pueden incidir directamente sobre la naturaleza de la ciudad. Una correcta observación del margen tectónico donde se encuentra el objeto de estudio y las influencias que de este se desprenden en el ámbito urbano, facilitará el análisis y entendimiento de los próximos apartados y dará un panorama general de los aspectos geológicos y geomorfológicos que gobiernan la ciudad en cuestión.

Algunas ciudades modernas están altamente impactadas por el marco tectónico sobre el que se encuentran, a tal punto donde su desarrollo busca acomodarse a los fenómenos geológicos que se desprenden directamente de este.

Un ejemplo observable actualmente es la ciudad de Tokio en Japón. Es la urbe más grande del mundo, con más de 36.000.000 de habitantes (U. N., 2016), y se encuentra en una margen activa donde colisionan dos placas oceánicas para formar un arco de islas. El espacio urbanizable en las islas del Japón es realmente escaso debido a su terreno montañoso. Por lo tanto, cualquier valle o planicie es ampliamente aprovechada para llevar a cabo actividades de cultivo y asentamientos (Fig. 42 a). Igualmente, dada la actividad tectónica, el país se encuentra bajo amenaza constante de sismos de gran magnitud y tsunamis. Sin embargo, el riesgo puede ser relativamente bajo, dada la “cultura sísmica” que ha perfeccionado el país al entender primordialmente la zona geológica en la que habitan (Sima Ajami, 2009), desarrollando de esta forma técnicas constructivas y urbanísticas resilientes que mitigan dichos fenómenos (World Bank, 2016).

### **7.2.2 Cambio Climático**

Seguido de este apartado se tiene en orden de magnitud y escala el cambio climático. Este aspecto, tan discutido últimamente, empieza a ser tema central en planes de gobierno y modelos de desarrollo urbanístico. Su impacto varía considerablemente de un lugar a otro y es por esto que ciertas ciudades alrededor del mundo ya han empezado a experimentar ciertos fenómenos atribuidos a dicho proceso. Algunas urbes, específicamente las localizadas en las costas, se están cuestionando si es necesario tomar medidas contra un posible aumento significativo del nivel del mar. Y es aquí, donde la planificación urbana, entendiendo las posibles variaciones a futuro debe intervenir y pensar la manera más eficiente para afrontarlo y mitigarlo.

El efecto en otras ciudades no costeras puede ser más difícil de cuantificar y predecir, y puede variar desde pequeños aumentos de la temperatura promedio, hasta la aparición de nuevos vectores de enfermedades por el cambio de ciertos

factores ecológicos que favorecen la aparición y subsistencia de especies transmisoras en regiones donde nunca se habían reportado (Githeko et al., 2010).

### **7.2.3 Geología Regional**

En orden de importancia, el tercer factor a considerar dentro de los indicadores geológicos y geomorfológicos sería la geología regional. Al ser este apartado tan extenso, con la intención de facilitar la evaluación de los componentes y reducir la variabilidad de los análisis, se propone dividir dicha temática en tres aspectos que pueden resumir de una mejor forma el concepto de geología regional, estos son: geología general, estratigrafía y geología estructural.

- ❖ La geología general abarca todos los cuerpos geológicos que tienen una influencia directa o indirecta con la ciudad y su proceso de expansión y crecimiento. Esta más relacionada con la posición geográfica de los cuerpos y como su naturaleza física interviene con la naturaleza urbana.
- ❖ La estratigrafía busca relacionar que aspectos característicos de una ciudad son otorgados o influenciados por un cuerpo o una variable geológica en particular.
- ❖ La geología estructural debe mostrar como los aspectos estructurales (fallas, pliegues, etc.) interactúan o rigen ciertas características del entramado urbano, como límites, elecciones constructivas, restricciones, entre otros.

Para ejemplificar los dos primeros aspectos, los cuales pueden resultar un tanto parecidos: Existen ciudades localizadas sobre una geología relativamente monótona, donde solo se diferencien dos o tres cuerpos principales. O ciudades que se desarrollen en lugares donde la estratigrafía es variable, sin embargo, de manera particular, gran cantidad de su desarrollo esta cimentado (ya sea urbanística o económicamente) sobre un cuerpo en particular de la secuencia, explotando de manera creativa las características únicas que lo hacen diferenciable de los demás. Ejemplos como estos los podemos encontrar en Petra o el distrito de Manhattan, en Nueva York, donde particular mente el desarrollo se lleva a cabo en su gran mayoría

sobre una sola unidad geológica, generalmente porque es la más apta para materializar los ideales de ciudad que sus habitantes tienen en mente.

#### **7.2.4 Geomorfología**

El cuarto indicador propuesto en esta rama geológica-geomorfológica es la geomorfología. Al igual que la geología regional y los demás aspectos que se analizarán en los párrafos siguientes, la geomorfología es una disciplina bastante amplia donde pueden intervenir una gran cantidad de temas. Se propone entonces abordar el tema en dos secciones: geomorfología regional y local, teniendo cada una de estas a su vez sus correspondientes subdivisiones. Dichas subdivisiones pueden ser tan profundas o detalladas como el autor quiera o el caso en particular lo amerite. La geomorfología es relativamente observable a simple vista y muchos de sus aspectos pueden llegar a influir ampliamente o no sobre la configuración de una ciudad. Sin embargo, mucho de esto depende de la escala con la que se esté abordando la geomorfología, y por supuesto, el tamaño mismo de la ciudad.

Grandes conurbaciones pueden entrar en contacto con diferentes unidades geomorfológicas, sin embargo, dado la gran extensión que poseen algunas de estas, pueden ejercer más control o influenciar ciertos tipos de organización urbana en diferentes partes de la conurbación y a diferentes escalas. El detalle hacia el cual se quiera volcar la investigación será a criterio propio del grupo multidisciplinario, y por supuesto estará altamente condicionado por el alcance del estudio.

La geomorfología impacta en gran medida el estilo de desarrollo y le da carácter único a una ciudad. En muchos casos, dicta directrices que obedecen a un entendimiento propio de sus habitantes de su entorno inmediato, lo cual plasma una relación tangible de como los seres humanos, aunque capaces de transformar el terreno, se adaptan a este aceptando las imposiciones mismas (sencillas o no) que se desprenden de él. La geomorfología puede limitar el espacio vital o, por el contrario, facilitar y promover su expansión (Fig. 42).



**Figura 42.** Influencia de la geomorfología a mediana y gran escala en la configuración urbana: A. Prefectura de Tokuushima, Japón; B. Fish Hoek, Sur África; C. Conurbación de Chicago, Illinois. (Tomado de Google Earth).

### 7.2.5 Hidrogeología

En orden de escala, el siguiente indicador que se presenta en la matriz es la hidrogeología. El recurso agua, en todas sus variaciones, es fundamental para la



subsistencia humana y un sinfín de actividades y procesos que llevamos a cabo, no solo como seres vivos, sino como individuos sociales altamente evolucionados con la capacidad de aprovechar de diferentes formas las amplias cualidades que ofrece este líquido esencial. Difícilmente se puede dar un desarrollo urbano sin la presencia de un suministro de agua adecuado (Fig. 43). De hecho, se podría relacionar el inicio de muchas urbes en el planeta con la cercanía o inmediatez de un cuerpo de agua.



**Figura 43.** El antiguo Egipto adoptó como eje de su civilización y desarrollo el Nilo, no solo como fuente vital de agua, sino como medio de transporte y comunicación que acorto las distancias (Tomado de: Shaw, 2003. Crédito de la imagen: Mark Lehner).

Dentro de la matriz, se presentan cuatro subdivisiones que pretenden abarcar la importancia del agua y su relación con el aspecto urbano. De esta forma, el equipo evaluador determinará que tanta influencia tienen las corrientes superficiales, las aguas subterráneas y los reservorios (embalses) en el sostenimiento y expansión



de una ciudad, así como la calidad misma del líquido, la cual es fundamental para el bienestar de la población.

#### **7.2.6 Geología Ambiental**

Siguiendo esta línea metodológica propuesta en base a la escala, el siguiente indicador es la geología ambiental, que ha sido una temática ampliamente difundida en nuestro medio y América Latina en general, en parte por el interés en los desastres de origen natural y los conceptos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo que se derivan de ellos. Sin embargo, además de los desastres de origen natural clásicos que pueden ocurrir en una región en particular (la selección de los mismo dentro de la tabla corresponderá en gran medida a los autores y el lugar de estudio), en este apartado se ha decidido incluir los materiales de construcción y consumo, y los desechos como agregados fundamentales de la geología ambiental, los cuales tienen un impacto directo en el universo urbano. La inclusión de estos dos aspectos antes mencionados obedece a la necesidad de ver esencialmente a la ciudad como un ente dinámico que constantemente demanda y desecha una gran cantidad de recursos, los cuales son fundamentales para su expansión y desarrollo.

La gran mayoría de ciudades modernas alrededor del mundo están edificadas con los materiales inmediatos que se encuentran en su radio de influencia. La variabilidad y uso de estos materiales depende en gran medida de los diferentes cuerpos geológicos y recursos forestales presentes en este radio de influencia; y por supuesto, de las técnicas constructivas seleccionadas por sus habitantes.

Es llamativo señalar que hemos adoptado una técnica urbanística que requiere remover grandes volúmenes de materiales de los cuerpos circundantes para luego transformarlos y “apilarlos” nuevamente de una manera “antropomórfica” de acuerdo a nuestros criterios de seguridad y confort. Por consiguiente, el volumen total desplazado de estos materiales puede permanecer relativamente constante y lo que en realidad estamos haciendo es relocalizarlo en nuestras ciudades. Por consiguiente, la especie humana se ha convertido en uno de los mayores agentes de transformación del paisaje (Keller, 2011), ocasionando no solo grandes cambios

en su apariencia, sino transformando y alterando dinámicas pre-establecidas en el tiempo, cuyas consecuencias turban a pequeña, mediana y gran escala equilibrios ecosistémicos.

De igual forma como transformamos el paisaje a través de la extracción de sus constituyentes, también lo alteramos por la producción de grandes cantidades de desechos que deben ser almacenados en sitios específicos y adecuados para evitar impactos ambientales de mayores proporciones. El total de desperdicios sólidos generados en el mundo por día asciende a más de 3.500 millones de toneladas (Tabla 1). Siendo los países desarrollados (OECD) y el Asia pacífico los mayores productores, aportando el 65 % de la producción mundial diaria (World Bank, 2012).

**Tabla 1.** Generación de desperdicios sólidos por región presentes y proyectados al año 2025 (Tomado de: World Bank, 2012)<sup>1</sup>.

Region	Current Available Data			Projections for 2025			
	Total Urban Population (millions)	Urban Waste Generation		Projected Population		Projected Urban Waste	
		Per Capita (kg/capita/day)	Total (tons/day)	Total Population (millions)	Urban Population (millions)	Per Capita (kg/capita/day)	Total (tons/day)
AFR	260	0.65	169,119	1,152	518	0.85	441,840
EAP	777	0.95	738,958	2,124	1,229	1.5	1,865,379
ECA	227	1.1	254,389	339	239	1.5	354,810
LCR	399	1.1	437,545	681	466	1.6	728,392
MENA	162	1.1	173,545	379	257	1.43	369,320
OECD	729	2.2	1,566,286	1,031	842	2.1	1,742,417
SAR	426	0.45	192,410	1,938	734	0.77	567,545
Total	2,980	1.2	3,532,252	7,644	4,285	1.4	6,069,703

El verdadero problema que representa esta situación para las ciudades se resume a un tema de espacio: ¿Dónde acomodar semejantes cantidades de desechos de manera segura en un lugar que no afecte los procesos expansivos de las urbes? Actualmente hay iniciativas de convertir estos rellenos en zonas urbanizables, y hay casos, a mediana escala, donde se han obtenido resultados satisfactorios. Sin

<sup>1</sup> Abreviaciones: AFR: África, EAP: Asia del este y pacífico, ECA: Asia central, LCR: América latina y el Caribe, MENA: Oriente medio y norte de África, OECD: Países de la organización económica para la cooperación y el desarrollo, SAR: Sur de Asia.

embargo, aún queda por revisar cuales son los efectos de estos rellenos adecuados a largo plazo y sus verdaderas implicaciones en la evolución urbana.

En cuanto a los desastres de origen natural, no se justificarán en gran extensión dado el estado del arte tan amplio que se tiene en nuestro ámbito, así como la gran cantidad de investigaciones y trabajos que se pueden encontrar en el medio académico y gubernamental.

Una vez conceptualizado los aspectos anteriores, el curso del estudio toma matices de escalas más locales. Donde las preocupaciones del equipo multidisciplinario deben enfocarse en problemáticas más puntuales, que en muchos casos ya no están relacionadas con grandes grupos poblacionales, sino con comunidades o grupos más pequeños, hasta llegar casi a aspectos que atañen a individuos.

#### **7.2.7 Geotecnia**

El primer indicador geológico-geomorfológico que intervendría en esta nueva sección seria la geotecnia. El aspecto geotécnico en este sentido, pretende dar una mirada general de las características (principalmente mecánicas) del suelo donde se ha llevado a cabo o se llevará el proceso constructivo que compone la ciudad. Para esto, se ha introducido una subdivisión, donde se analice el componente suelo desde una mirada ingenieril (cimentaciones) y a la vez urbana con miras hacia la planeación (suelos o tipos de suelos). Lo primero se relaciona intrínsecamente con los métodos constructivos más adecuados que deben implementarse de acuerdo con las características mecánicas del suelo; mientras lo segundo evoca una contrastación con los denominados P. O. T (en Colombia), los cuales sectorizan extensiones de tierra de acuerdo a su aptitud, naturaleza o aprovechamiento.

#### **7.2.8 Geología Económica**

Siguiendo este orden de ideas, el próximo aspecto a discernir es la geología económica. Aunque en párrafos anteriores se discutió dentro de la geomorfología el aspecto de materiales de construcción y consumo, aquí se exhorta a abordar el tema bajo una perspectiva netamente relacionada con la minería y los recursos

minerales; diferentes a aquellos contemplados como insumos de la construcción u otros bienes de consumo inmediato.

La minería debe focalizarse en la localización actual de las minas y considerar el proceso de explotación como agente obstaculizador o promotor de la evolución urbana. La presencia de explotaciones dentro del perímetro urbano puede traer consigo numerosos conflictos, no solo de espacio, sino potenciales problemas ambientales y efectos perjudiciales para la salud de los habitantes. Sin embargo, cuando se abandonan estas actividades, ofrecen numerosas oportunidades para contribuir al bienestar urbano mediante la concepción de espacios dedicados a la comunidad.

Por otra parte, no es beneficioso obliterar por completo los potenciales recursos minerales que pueden ser un aporte económico importante para la ciudad, pues estos dan en cierta medida autosuficiencia y capacidad de autoabastecimiento. Es por esta razón que es necesario identificar y proteger potenciales yacimientos que representen un futuro ingreso importante para la ciudad, pues en materia económica, se convertirán en un posible motor de desarrollo que podría verse reflejado en el grado de evolución urbana.

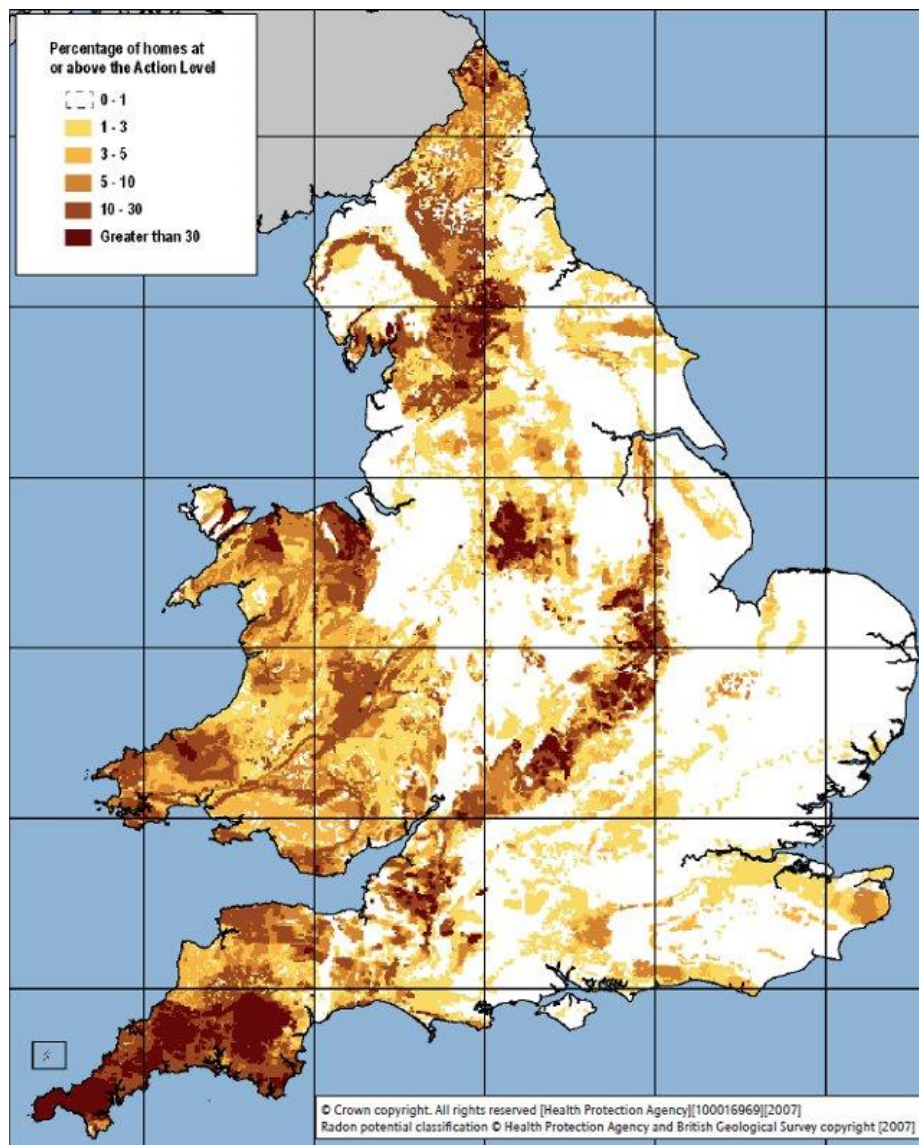
#### **7.2.9 Geomedicina**

La geomedicina (o geología médica en ciertos países) puede parecer un término extraño, incluso incongruente, y en nuestro ámbito, como una ciencia supremamente nueva, la cual tiene mucho camino por recorrer. Sin embargo, esta última aseveración no es cierta en su totalidad. La geomedicina es una disciplina bien establecida que lleva un poco más de 4 décadas de avance, principalmente en los países nórdicos. Autores como Låg (1972); Låg y Bølviken (1974); Låg (1980) y Låg (1990) han profundizado ampliamente en el tema.

La disciplina ha evolucionado desde una concepción insipiente de la distribución de agentes perjudiciales en un espacio geográfico, hasta el estudio y entendimiento de la interacción de los parámetros de salud con el entorno donde habita el individuo

(Kamel Boulos y Le Blond, 2016). En otras palabras, actualmente se encarga de estudiar los agentes riesgosos para la salud derivados de la naturaleza geológica (física o química) de ciertos cuerpos. Y aunque sea difícil de asimilar, es veras que numerosos agentes derivados de las rocas y sus componentes representan una amenaza potencial a la salud.

Un caso bien documentado en los Estados Unidos y Europa es la acumulación de gas Radón en hogares (Fig. 44). El gas es de naturaleza radioactiva y es emanado naturalmente por grandes cuerpos rocosos con presencia de Uranio (U-238), particularmente ciertos tipos de areniscas, shales y en especial granitos pueden llegar a contener hasta más de 3 ppm de U-238 (Appleton, 2005 en: Keller, 2011). El gas puede filtrarse a los hogares a través del aire, pues este es emanado naturalmente de las rocas o de los suelos derivados de estas; por contaminación de aguas subterráneas en contacto con la roca madre; o estar presente en materiales de construcción. Afectar a todas las personas, produciendo cáncer de pulmón; el riesgo aumenta en las personas fumadoras y los niños (U. S. Environmental Protection Agency, 1986 en: Keller, 2011).



**Figura 44.** Porcentaje de hogares en Inglaterra por encima del nivel mínimo aceptado de gas Radón (URL: <http://wordpress.mrreid.org/2011/12/28/radiation-in-the-uk/> [27.02.2017]).

No solo los efectos del gas Radón son considerados por la geomedicina. La química del agua y su concentración de Ca, Mg y Fe está relacionada a la ocurrencia de enfermedades del corazón, como la enfermedad coronaria y cardiovascular (Rubonowitz-Lundin y Hiscock, 2005). Cuando el agua tiene altas concentraciones de estos elementos, se denomina agua dura o pesada (*hardwater*). Por el contrario, el agua que contiene poca concentración de los elementos ya mencionados es

llamada agua ligera o suave (*softwater*), y es esta variación la que parece presentar una relación con enfermedades cardíacas en países como Gales, Japón, Inglaterra, Suecia y Estados Unidos (Keller, 2011).

La concentración de material particulado en el aire también es causa de enfermedades, principalmente aquellas relacionadas al sistema respiratorio (Kasper et al., 2015). El material particulado se define como todo sólido (o líquido en algunos casos) desintegrado hasta conformar de 10 a 2.5 ppm, con un diámetro menor a 10  $\mu\text{m}$ . Estas partículas son introducidas a la atmósfera por procesos tanto naturales como humanos, y pueden dispersarse y recorrer grandes distancias gracias a la distribución de los vientos. Algunos componentes que pueden ser desintegrados y transportarse por este medio son el Asbesto, el Plomo y el Cadmio.

Como puede apreciarse, hay una preocupante cantidad de elementos y factores con los que entramos en contacto permanente que pueden representar una seria amenaza a la salud. La identificación, documentación y distribución de estos es bastante escasa en nuestra región, y aunque se sabe formalmente de los riesgos que representan, los esfuerzos por adelantar estudios profundos sobre estos son lentos. El ámbito urbano no está bajo ningún motivo exento de esto. Por eso, los estudios geológico-urbanos, en conjunción con la geomedicina deben abordar esta problemática para trazar líneas de desarrollo encaminadas a la protección y bienestar de los habitantes.

Dentro del estudio de los I. G. U. se propone contrastar la geomedicina con diferentes aspectos urbanos. Para esto se han propuesto dos temáticas principales: Enfermedades asociadas a la geología y riesgos de salud derivados de la geología. El primer aspecto profundiza en el aspecto propio de las enfermedades que ya se han comprobado, pueden derivarse de efectos geológicos; el segundo está pensado en analizar, hipotéticamente, cuales factores no confirmados, derivados de la naturaleza geológica pueden llegar a afectar la salud directa o indirectamente.



### **7.2.10 Indicadores Urbanos**

El otro componente de los I. G. U. dentro de la matriz cruzada son los indicadores urbanos. La selección de estos elementos viene dada principalmente por los parámetros de planificación considerados por Legget (1973) en su obra clásica *Cities and Geology*. Los parámetros aquí presentes son aquellos que tienen una alta influencia por parte del entorno natural y son propuestos por la *American Society of Civil Engineers* (Pollard y Moore, 1969 en: Legget, 1973).

Como la disciplina de la planeación urbana también es bastante extensa, se ha decidido incluir solo aspectos de la planeación que pueden llegar a tener una relación observable con la geología y la geomorfología. Sin embargo, como se ha mencionado reiteradamente, es posible agregar nuevos indicadores conforme el estudio o las necesidades lo ameriten. Algunas variables sociales como etnias, razas o religión han sido omitidas por la dificultad que representa encontrar una relación directa de estas con la conformación del espacio físico.

La explicación de cada uno de los parámetros que intervienen dentro de este indicador no es tan esencial como la descripción hecha en los párrafos anteriores para los indicadores geológico/geomorfológicos, puesto que la acotación y claridad de cada uno de los subtemas es en sí misma suficiente para dejar claro el objetivo que busca analizar. Sin embargo, como una excepción a esta afirmación, y para evitar ambigüedades en el estudio, se exponen las siguientes aclaraciones:

- ❖ Los indicadores urbanos no necesariamente están presentados de manera que ejemplifiquen su escala o importancia. Su organización está dada en gran medida por el orden en que se abordan dichos temas en los estudios de planificación.
- ❖ En el apartado de Población, el subtema denominado Factores Sociales y Servicios se refiere a la situación y bienestar social con referencia al acceso a servicios básicos que sustenten dicho bienestar.

- ❖ En el apartado Uso de la Tierra, es necesario aclarar que el subcomponente Protección está referido a todas aquellas porciones de tierra que han sido designadas para protección o de esparcimiento público (recreación).
- ❖ En el último apartado, etiquetado como Social y Otros, el subtema protección de la población está relacionado con la protección natural que puede ofrecer el entorno natural a los individuos que allí habitan. Esta protección puede darse contra agentes de carácter natural o agentes externos y/o antrópicos.

### **7.3 Análisis posterior**

Una vez culminado el análisis cruzado de cada uno de los aspectos geológico/geomorfológico con los aspectos urbanos, el equipo multidisciplinario debe proceder a evaluar cuales son estos aspectos de naturaleza geológica que más están incidiendo sobre el ambiente urbano actualmente, si el estudio se está conduciendo en tiempo presente; o cuáles son los que más deben ser tenidos en cuenta a futuro si el estudio tiene un carácter planificativo.

Como se tienen una gran cantidad de cruces, lo que representa un conjunto importante de datos que dificultarían el análisis práctico, se propone agrupar los cruces por macro-indicadores. Los cuales corresponden simplemente a un cruce entre la totalidad de un indicador geológico/geomorfológico con la totalidad de un indicador urbano. Por ejemplo: El cruce de todos los aspectos de geología ambiental con todos los aspectos de población es el macro-indicador geología ambiental - población.

El peso de cada macro-indicador se reporta en porcentaje y se obtiene mediante la sumatoria total de cada uno de los valores reportados (0 a 4) entre los cruces de los indicadores, divididos por la sumatoria del valor máximo hipotético que podría alcanzar el macro-indicador si todos los cruces de todos los indicadores son reportados con el calificativo de “Muy alta relación” (4), multiplicado todo por cien (100):

$$\text{Peso Macro – Indicador} = \left( \frac{\sum \text{valores reportados}}{\text{valor máximo hipotético}} \right) \times 100$$

El peso del macro-indicador también podría reportarse mediante un promedio de los datos (calificaciones) que intervienen en el cruce, o podría complementarse a través de la inclusión de análisis estadísticos básicos como las medidas de moda y desviación. Sin embargo, es realmente importante recalcar que la aplicación y adición de todos estos métodos arrojaran resultados muy similares, pues la naturaleza de los datos es cualitativa, dependiendo en gran medida del conocimiento y experticia de las personas involucradas en el estudio y la elaboración de la tabla. Igualmente, el hecho de tener una naturaleza cualitativa permitirá agregar y eliminar variables que pueden ser consideradas por las mismas personas que intervienen en el estudio. Pues igualmente, la importancia fundamental del estudio radicara, no en la cantidad de datos o cruces entre indicadores, sino en la percepción y la calificación última que se registre, y es aquí donde radica la importancia del dato cualitativo.

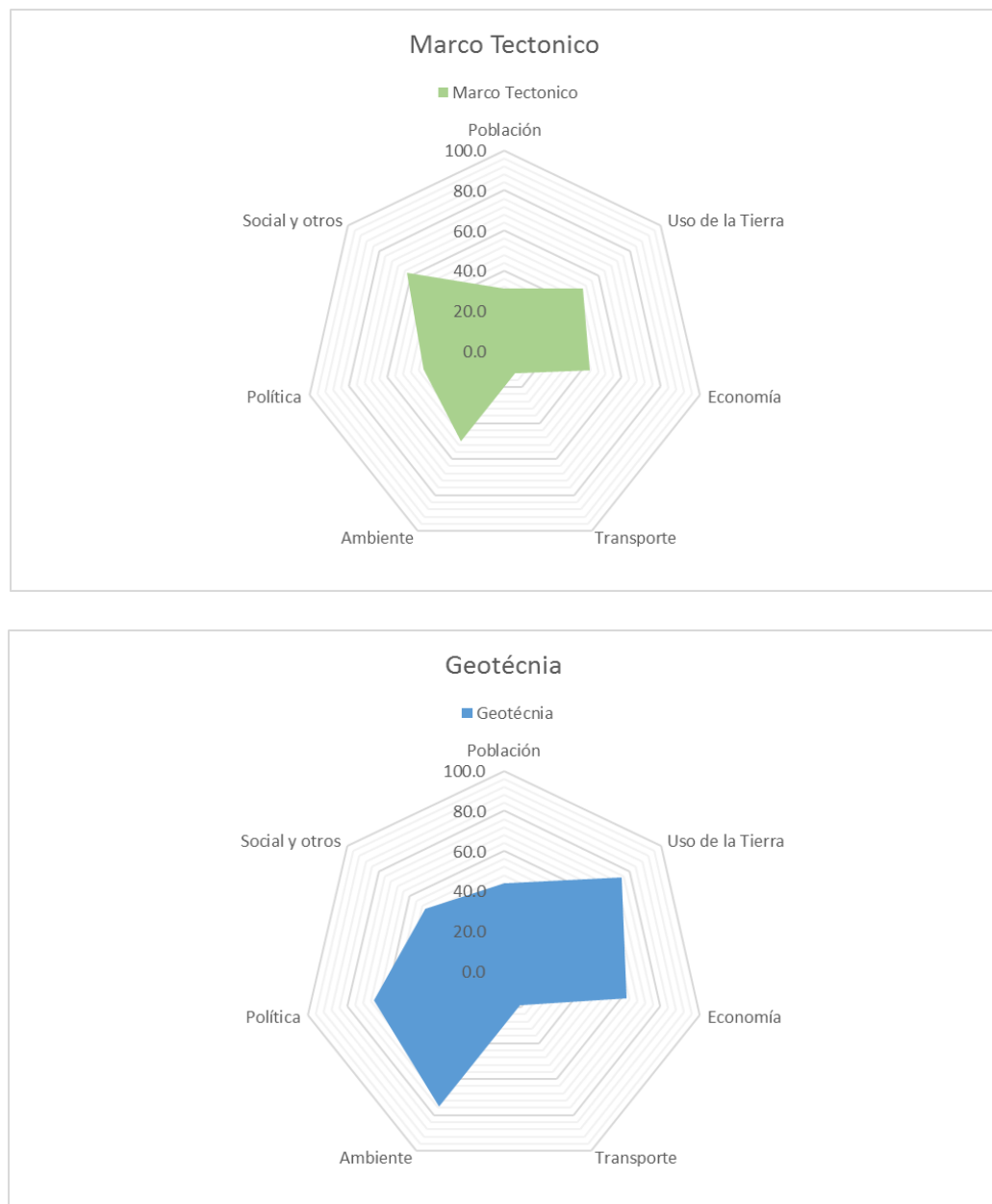
Las ciencias de la tierra están cimentadas sobre una gran base de datos cuantitativos, sin embargo, en el ámbito de los estudios urbanos, sobre todo al considerar su naturaleza altamente variable, es difícil enmarcar dicha aleatoriedad bajo una mirada cuantitativa más rígida. Es por esto que se ha decidido conducir la base del estudio geológico-urbano bajo una óptica cualitativa, pues permite una flexibilidad parcial en la inclusión de las variables que intervienen, dando un acercamiento más fiel a la compleja naturaleza urbana, difícil de cuantificar o parametrizar en muchos aspectos. Consecuentemente, el cruce entre dos disciplinas que en muchos casos pueden parecer diametralmente opuestas en contenido y naturaleza, puede facilitarse mediante el manejo de datos cualitativos, donde la importancia del registro radicará ampliamente en la apreciación y conocimiento de la persona o grupo de personas que lo someten a evaluación.

Se procede a continuación a graficar los resultados de los pesos de los macro-indicadores. Graficar la relación entre tantas variables en un gráfico común donde

generalmente se relacionan dos variables es poco ilustrativo y confuso. Para esto se propone la utilización de gráficos de áreas, los cuales permiten relacionar un solo aspecto con múltiples variables. El aspecto queda consignado a través de un polígono, donde sus vértices se grafican de acuerdo a que tanta incidencia (peso) tiene dicho aspecto con las múltiples variables urbanas que se proponen. El resultado, el cual es en parte un resultado gráfico, facilita su lectura y permite determinar rápidamente, de acuerdo al área o tamaño que alcanza el polígono, que tanta importancia tiene el aspecto geológico-geomorfológico urbano que se está analizando, con respecto a las variables urbanas escogidas (Fig. 45).

Al ser un resultado gráfico, su interpretación por parte de personas que estén poco familiarizadas con los temas será más sencilla. Igualmente, dada esta característica, se facilita ampliamente la comparación entre los diferentes macro-indicadores involucrados, permitiendo la identificación rápida de aquellos que tengan mayor importancia para el futuro desarrollo del estudio geológico-urbano.

La conjugación de los valores obtenidos en la tabla, sumada a la visualización gráfica ayudarán a determinar cuáles son los macro-indicadores que deben ser tenidos en cuenta para continuar con el proceso investigativo geológico-urbano. Aquellos que queden categorizados dentro del rango nombrado “Muy alta relación” (porcentaje de incidencia entre 81 – 100 %), serán los macro-indicadores con más alta prioridad para ser introducidos y analizados en el estudio. Consecuentemente, si desea profundizaros más en el estudio y ver que otros macro-indicadores juegan un papel importante, pueden considerarse aquellos que entran dentro del rango “Alta relación” (porcentajes entre 61 – 80 %).



**Figura 45.** Gráficos de áreas, donde se visualiza el peso del indicador geológico-geomorfológico con cada uno de los indicadores urbanos involucrados. Conforme tienda más a los vértices del heptágono mayor es la incidencia del indicador. El área total representa el peso total del indicador geológico-geomorfológico en cuestión sobre toda la naturaleza urbana involucrada del caso de estudio.

Con la determinación de los macro-indicadores más significativos (y los respectivos indicadores que los componen), se procede a la elaboración y justificación de cómo

estos aspectos intervendrán o deben ser acogidos para llevar a cabo los planes de desarrollo futuros influenciados por la geología y la geomorfología.

#### 7.4 Demostración – Caso de estudio

Con el fin de ejemplificar más claramente lo que se ha expuesto en los párrafos anteriores, y con la intención de mostrar el desarrollo metodológico de los indicadores, se procede a continuación a realizar un estudio de caso para la subregión del oriente Antioqueño, donde se enmarcan los 9 municipios cercanos y con un centro de desarrollo localizado en la ciudad de Rionegro (Fig. 46).



**Figura 46.** Localización del altiplano del oriente antioqueño con respecto a la ciudad de Medellín.

Se observan los municipios principales que lo conforman, con la población de Rionegro en el centro (Global Mapper 18.2).

La selección de esta subregión parte de la relativa similitud en materia de planificación que tienen dichos municipios, así como los intereses comunes que comparten en muchos casos en materia de desarrollo, economía, ambiente, entre otros. Como muestra de esto, actualmente se están ejecutando planes por parte de los Municipios Asociados del Oriente Antioqueño (MASORA) para configurar un área metropolitana en dicha región, iniciativa que irá a refrendación en el año 2018 (Trujillo, 2017).

Es de suma importancia anotar que los procedimientos expuestos a continuación fueron elaborados por una sola persona, y no por un grupo multidisciplinario como

se propone en el escrito, lo cual es sumamente recomendable para evitar el sesgamiento de los resultados y la falta de conocimiento esencial en diversas materias que se requiere para llevar a cabo un análisis completo con buenas bases teóricas.

Una vez aclarado esto, a continuación, se presenta la matriz cruzada con los I. G. U. para la región del oriente antioqueño (Fig. 47).



Caso de estudio:	Oriente antioqueño
Proyección:	Futuro
Carácter:	Planeación

GEOLOGICOS/GEOMORFOLÓGICOS		URBANOS				Uso de la tierra				Economía				Transporte		Ambiente			Política			Social y otros			
		Crecimiento	Densidad	Migración	Factores sociales y servicios	Expansión	Urbanización	Uso industrial	Protección	Base económica	Necesidades económicas	Oportunidades económicas	Turismo	Trafico y consumo	Transporte público	Clima	Protección contra desastres	Conservación de recursos naturales	Legislación	Admin. Pública	Participación ciudadana	Adaptación y recuperación de las comunidades humanas sobre el terreno	Protección de la población	Relocación	Valores estéticos
Marco tectónico		1	0	3	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1
Cambio climático		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Geología regional		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Geología estructural		0	1	2	1	1	3	3	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Geomorfología	Estructuras regionales	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Superficies de erosión	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Drenajes	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Tipos de laderas/collinas/planicie	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Pendientes	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Hidrogeología	Corrientes superficiales	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Aguas subterráneas	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Reservorios	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Calidad del agua	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Geología ambiental	Riesgos geológicos	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Inundaciones	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Vulcanismo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Geotécnica	Desechos	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Cimentaciones	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Geología económica	Suelos	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Minería - explotación	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Geomedicina	Recursos minerales	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Enfermedades asociadas a la geología	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Riesgos de salud derivados de la geología		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Muy alta relación	4
Alta relación	3
Mediana relación	2
Baja relación	1
Sin relación	0

Figura 47. Matriz cruzada con los I. G. U. seleccionados que intervienen en el caso de estudio del oriente antioqueño.

Como puede observarse, para la realización del estudio se han seleccionado los indicadores ya mencionados en el texto previamente, y como consideración particular de este caso, se han añadido dos subdivisiones extras en el indicador de Geomorfología Regional: Escarpes y Superficies de Erosión. Los cuales son dos factores únicos que atañen a esta región, por lo cual deben ser considerados como factores potenciales que actuarán de manera importante en la planificación urbana.

Si se observa detenidamente la matriz, para este caso vemos a grandes rasgos ciertos valores con calificativos iguales a 4, denotando una muy alta relación en algunos cruces de indicadores. Sin embargo, no se observa una tendencia clara si se observa todo el panorama de manera global. La elaboración de los pesos de los macro-indicadores preverá una visión más simplificada de las variables que están interviniendo y será posible determinar cuáles cruces son los que realmente están teniendo un peso más significativo.

Efectivamente, como se aprecia en la Fig. 48, con los cálculos de los macro-indicadores se clarifican ciertas tendencias y ahora es posible presenciar siete cruces dentro de la matriz con un peso realmente significativo (Categoría “Muy alta relación”). Dichos macro-indicadores son:

1. Cambio climático – Política.
2. Cambio climático – Ambiente.
3. Geotecnia – Uso de la tierra.
4. Geomorfología – Uso de la tierra.
5. Geotecnia – Economía.
6. Geotecnia – Política.
7. Geología económica – Política.

Caso de estudio:	Oriente antioqueño
Proyección:	Futuro
Carácter:	Planeación

GEOLÓGICOS/GEOMORFOLÓGICOS		URBANOS				Uso de la tierra				Economía				Transporte		Ambiente			Política			Social y otros		
		Crecimiento	Densidad	Migración	Factores sociales y servicios	Expansión	urbanización	Uso industrial	Protección	Base económica	Necesidades económicas	Oportunidades económicas	Turismo	Trafico y conexiones	Transporte público	Clima	Protección contra desastres	Conservación de recursos naturales	Legislación	Admon. Pública	Participación ciudadana	Adaptación y modificación de los humanos sobre el terreno	Protección de la población	Relocación
Marco tectónico		12.5				25.0				18.8				12.5		25.0			16.7			31.3		
Cambio climático		75.0				50.0				56.3				50		51.7			100.0			75.0		
Geología regional	Geología general	33.3				79.2				54.2				45.8		47.2			36.1			60.4		
	Estratigrafía																							
	Geología estructural																							
Geomorfología	Estructuras regionales																							
	Superficies de erosión																							
	Drenajes	79.2				88.3				60.4				72.9		70.8			65.3			76.0		
	Tipos de laderas/colinas/planicie																							
	Pendientes																							
Hidrogeología	Vertientes																							
	Corrientes superficiales																							
	Aguas subterráneas	68.8				78.1				59.4				12.5		72.9			70.8			54.7		
	Reservorios																							
Geología ambiental	Calidad del agua																							
	Riesgos geológicos	Inundaciones	39.6				47.2				48.6				56.9		52.8			67.6			54.2	
		Vulcanismo																						
		Sismicidad																						
		Avenidas torrenciales																						
		Lluvias																						
	Deslizamientos																							
Hundimientos																								
Geotécnia	Materiales de construcción y consumo																							
	Desechos																							
	Cimentaciones	43.8				50.6				67.3				11.3		54.2			67.3			43.8		
Geología económica	Suelos																							
	Minería - explotación	46.9				75.0				65.6				25.0		50.0			67.3			34.4		
Geomedicina	Recursos minerales																							
	Enfermedades asociadas a la geología	75.0				46.9				31.3				0.0		33.3			70.8			43.8		
Riesgos de salud derivados de la geología																								

Muy alta relación	81 - 100
Alta relación	61 - 80
Mediana relación	41 - 60
Baja relación	21 - 40
Sin relación	0 - 20

Muy alta relación	81 - 100
Alta relación	61 - 80
Mediana relación	41 - 60
Baja relación	21 - 40
Sin relación	0 - 20

**Figura 48.** Macro-indicadores con sus respectivos pesos de incidencia en porcentaje.

#### **7.4.1 Cambio climático – Política**

Los efectos del cambio climático en Colombia son perceptibles, y su intensidad varía dependiendo del lugar, el ecosistema y la altitud. Las implicaciones que se pueden presentar dentro del territorio nacional comprenden desde un aumento de 1.5 °C, hasta alteraciones de la precipitación anual, con una variación del 15% en el promedio (Pabón, 2003). Lo que puede acarrear cambios significativos en el entorno natural, especialmente en aquellos lugares que presentan un equilibrio relativamente frágil y susceptible a las variaciones de temperatura. Es por esta cuestión, y por otros efectos aún no considerados, que el cambio climático debe ser una razón de debate y estudio dentro de las esferas gubernamentales, pues su aparición representa una seria amenaza para múltiples aspectos que dan funcionamiento a la maquinaria nacional, como la economía, el ambiente, y la misma sociedad.

En la sub-región del oriente antioqueño, las proyecciones del aumento de temperatura parecen ser más desalentadoras: hasta 2 °C; y la variación de las precipitaciones hasta un 10 % (Zapata et al., 2017). Cifras que pueden impactar fuertemente en los ecosistemas del altiplano. Por consiguiente, el factor político debe mirar seriamente este fenómeno, y crear mecanismos de participación ciudadana y planes de estudio y contingencia para afrontarlo. De esta incidencia tan directa, es quizás que el macro-indicador toma su importancia y peso relativo alto (100 %), pues representa una cuestión de primer orden que se avecina en un futuro realmente inmediato.

Sin embargo, de acuerdo a los planes de ordenamiento territorial para los municipios más importantes del oriente antioqueño, el concepto de cambio climático está identificado, pero no se profundiza más allá, y los esfuerzos se quedan en simples acciones de identificación, sin exponer una planificación seria o presentar una documentación adecuada de cuáles serán los efectos potenciales para cada municipio (En algunos P. O. T. la mención del cambio climático se reduce a un solo párrafo, signo alarmante del desconocimiento y falta de previsión).

Aunque en esta sección solo se está analizando el macro-indicador Cambio climático – Política, la configuración del estudio permite observar ciertas tendencias de cómo el cambio climático impactará otras temáticas referentes al desarrollo urbano. Es este panorama más global que ofrece la herramienta, el que puede empezar a introducirse en los P. O. T. de los municipios para tener un conocimiento expandido de los puntos críticos que influenciará el cambio climático.

La mirada política del cambio climático es sumamente importante, pues es de esta que se deben desprender los planes de desarrollo en materia política, social y ambiental para afrontar las posibles consecuencias y cambios venideros.

#### **7.4.2 Cambio climático – Ambiente**

Como se clarificó en el apartado anterior, el cambio climático impactará considerablemente la subregión del oriente antioqueño, y los municipios que la conforman están escasamente documentados en la forma como ocurrirá o se manifestará dicho fenómeno.

Lo que sí es seguro afirmar, es que el cambio climático impactará primordialmente el aspecto ambiental de la subregión. Con el aumento de la temperatura previsto, los componentes forestal y agrícola se verán afectados, pues el aumento mencionado puede modificar ciertos parámetros en el régimen de los cultivos y la subsistencia de especies adaptadas a condiciones actuales, las cuales se pueden modificar en el futuro.

Igualmente, el cambio en las precipitaciones puede derivar en la modificación del régimen hídrico, perjudicando directamente la disponibilidad del recurso, o por el contrario, fomentar la ocurrencia de desbordamientos e inundaciones. Además, la perturbación del componente hídrico y las precipitaciones modifican las tasas de erosión y denudación del suelo, trayendo consigo posibles pérdidas o modificaciones en el recurso, el cual representa un sustento fundamental para algunos municipios (POT Rionegro – Acuerdo N. 056, 2011; PBOT El Retiro – Acuerdo N. 14, 2013 y PBOT Guarne – Acuerdo N. 003, 2015).

#### **7.4.3 Geotecnia – Uso de la tierra**

Es innegable que uno de los procesos que más rápido crecimiento ha experimentado en los últimos años la subregión es la urbanización, tanto de viviendas urbanas como rurales. La compra de viviendas aumentó estrepitosamente en los últimos 7 años en un 500 % (Álvarez, 2016).

Gran cantidad de estas urbanizaciones y viviendas de recreo están acaparando una porción de suelo importante, en muchos casos sin tomar las consideraciones adecuadas en cuanto a los aspectos físicos del mismo, ni revisar si su naturaleza es apta o no para recibir y soportar el volumen de estructuras que se están construyendo (González, 2009 y Londoño, 2012).

Este macro-indicador busca mostrar que la relación de expansión urbana está impactando fuertemente el suelo disponible en la subregión. Por lo tanto, deben escogerse, desde el punto de vista geotécnico, los suelos más aptos para recibir esta carga constructiva, protegiendo los suelos menos adecuados para esta actividad y diferenciando los que son óptimos para el desarrollo de otro tipo de dinámicas que soportan aspectos como la economía o la protección ambiental.

#### **7.4.4 Geomorfología – Uso de la tierra**

La configuración geomorfológica de la zona de estudio es bastante particular, y está definida a escala regional por dos unidades fundamentales que definen la mayoría del paisaje físico: Las superficies de erosión y los escarpes (Rendón et al., 2011).

Las superficies de erosión están categorizadas según rangos de altura y la similitud entre características genéticas que presentan. Se componen de relieves relativamente uniformes, conformados por sistemas colinados de diferentes niveles, los cuales están disectados por corrientes hídricas (Gallego, 2011 en Rendón et al., 2011).

Las superficies de erosión están limitadas en la zona de estudio por los escarpes, que se caracterizan por pendientes abruptas que marcan un cambio significativo en

la topografía en relación con las superficies de erosión, además de exhibir un proceso de disección más avanzado (Gallego, 2011 en Rendón et al., 2011).

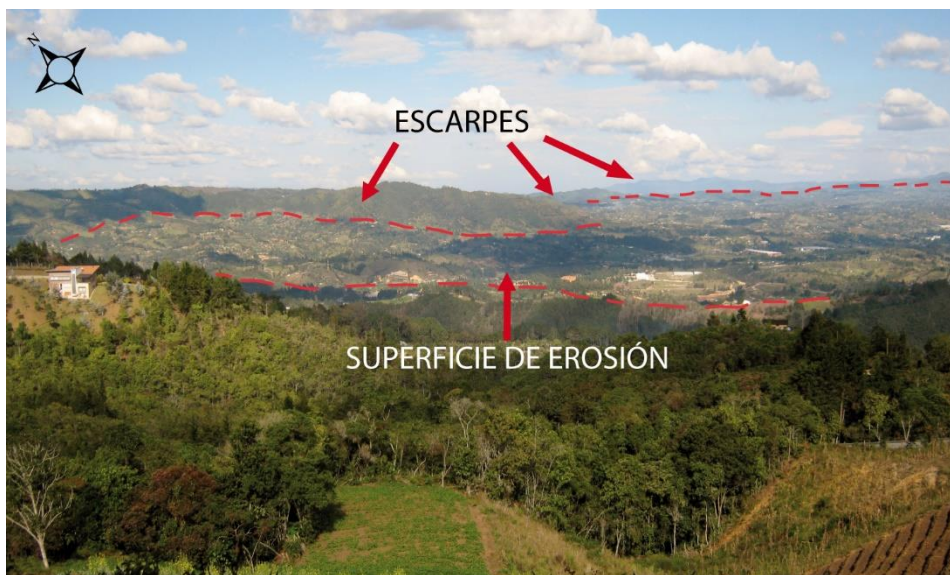
Estas dos geoformas fundamentales parecen dictar en gran parte la organización de los entramados urbanos actuales, y serán elementos altamente importantes que controlarán los procesos de expansión y desarrollo de las cabeceras municipales.

Se observa una relación importante, en donde la mayoría de los desarrollos urbanos principales se da sobre las superficies de erosión, y los escarpes fungen como zonas de protección, agricultura o corredores viales que interconectan las poblaciones.

Las superficies de erosión presentan características que facilitan el proceso urbanístico, dada su relativa homogeneidad topográfica y las extensiones continuas que abarcan. En contraposición, los escarpes plantean factores restrictivos, dada su naturaleza contrastante dictada por las pendientes abruptas y de difícil acceso que sesgan cualquier posibilidad de expansión urbana, pero al mismo tiempo, facilitan la delimitación de zonas de protección y cultivo. Además, debido a su distribución geográfica, son elementos que podrían ser aprovechados en materia de conexión vial, sin la necesidad de intervenir las redes viales urbanas, que se desarrollarían más fácilmente sobre la suave topografía provista por las superficies de erosión.

Es esta zonificación y el aprovechamiento de las características físicas particulares que impone cada una de las geoformas los fundamentos que se deben acoger para proponer un modelo de desarrollo equilibrado, que esté en concordancia con las aptitudes impositivas que se desprenden del factor geomorfológico (Fig. 49).





**Figura 49.** Principales geoformas en el oriente antioqueño cercano. La fotografía está tomada sobre la superficie de erosión de Santa Elena – La Unión. En el centro se observa la superficie de erosión de Rionegro y en el fondo se aprecian los escarpes que delimitan dicha superficie.

#### **7.4.5 Geotecnia – Economía**

Como se mencionó en la justificación del macro-indicador Geotecnia – Uso de la tierra, el proceso de urbanización acelerada representa al día de hoy un contundente renglón dentro de la economía de la subregión. Por consiguiente, es importante promover los suelos (áreas) de expansión que tengan las cualidades apropiadas para soportar la carga urbanística. La buena planificación en este sentido reducirá factores de riesgo en las futuras viviendas, lo que representará un ahorro importante en las finanzas de la subregión.

#### **7.4.6 Geotecnia – Política**

Consecuente con lo anterior, se deben promover políticas públicas que promuevan zonas de expansión urbana e industrial sobre áreas con especificaciones técnicas adecuadas para el soporte de estructuras específicas. Si el volumen de viviendas es muy alto, el substrato debe ser geotécnicamente idóneo para soportar dichas cargas estructurales, ya sea repartidas en grandes extensiones o concentradas en un solo punto. Igualmente, debe asegurarse el cumplimiento de los parámetros técnicos establecidos por las normas vigentes (NSR-10), así como promover la

realización de una microzonificación sísmica que establezca parámetros para la elaboración de un nuevo código acorde a las particularidades de la zona.

La promoción de políticas idóneas que estén encaminadas a maximizar y potencializar el uso del suelo de acuerdo a sus características mecánicas, podrá traducirse en una política de desarrollo, que no solo traerá beneficios económicos, sino que garantizará en parte la protección y buen aprovechamiento del recurso.

#### **7.4.7 Geología económica – Política**

El potencial actual de la geología económica de la subregión se encuentra en la extracción y procesamiento de materiales pétreos como arenas, gravas y arcillas (Posada y Sepúlveda, 2012). Los cuales son materia prima sumamente importante para otras actividades que fortalecen la economía de la subregión, como el urbanismo. Sin embargo, las actividades informales, sumadas al mal manejo ambiental y económico que se les da a los proyectos, ocasionan que la actividad minera presente numerosas incongruencias que se traducen en un impacto ambiental desmedido.

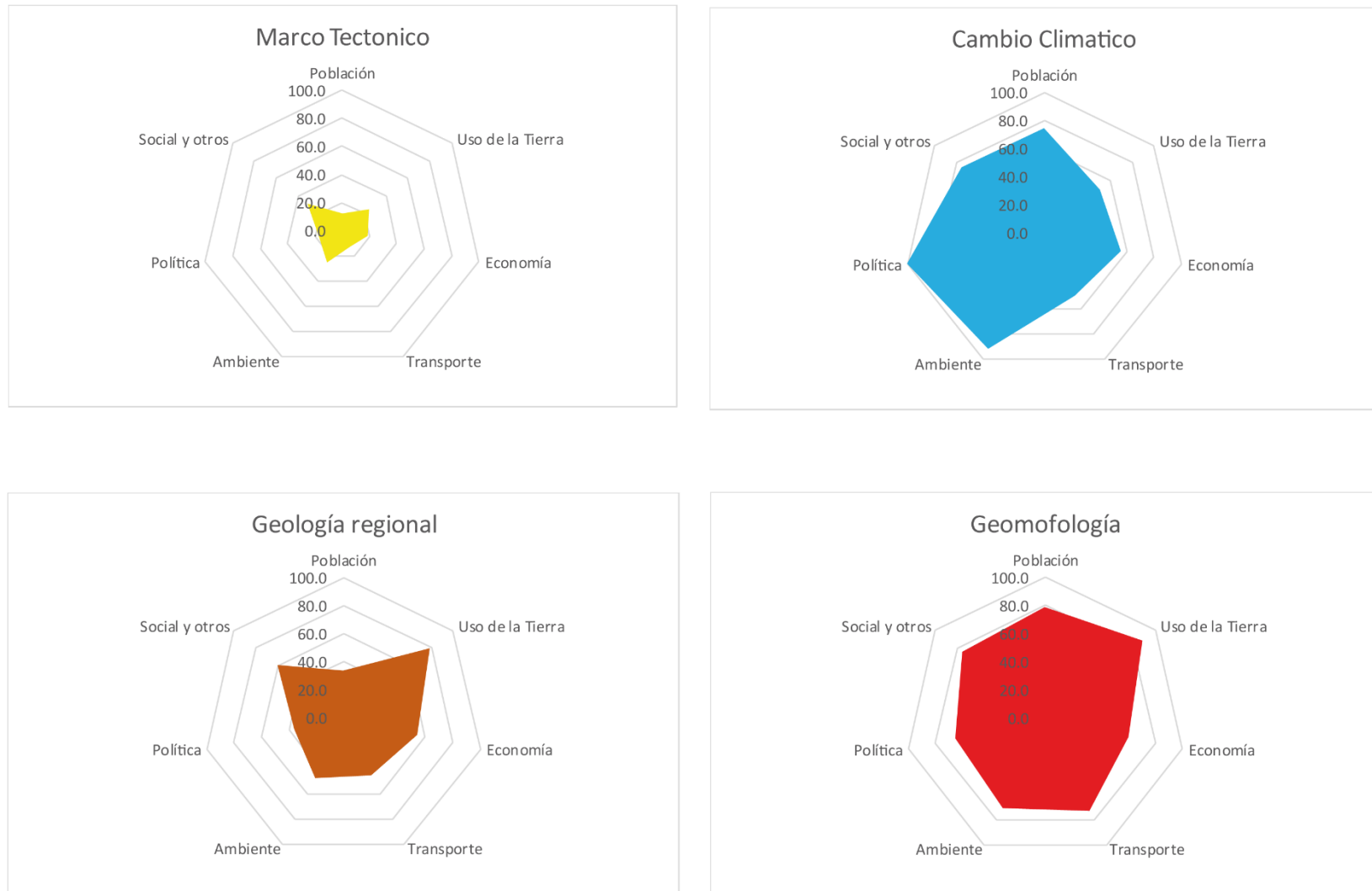
Según autores como Posada y Sepúlveda, (2012), los organismos de control no ejercen sus responsabilidades sobre aquellos individuos o empresas que se dedican a esta actividad, por lo que es esencial a futuro instaurar políticas de control que verdaderamente aboguen por una extracción responsable de los recursos, al tiempo que vigilen detenidamente su impacto ambiental. De esta forma, el macro-indicador Geología económica – Política se convierte en un importante pilar de desarrollo urbano futuro, pues busca identificar y proteger recursos de alto valor estratégico que serán la base fundamental para que se materialicen otras actividades económicas de vital importancia.

### **7.5 Representación gráfica de la influencia de los indicadores geológicos-geomorfológicos sobre los indicadores urbanos**

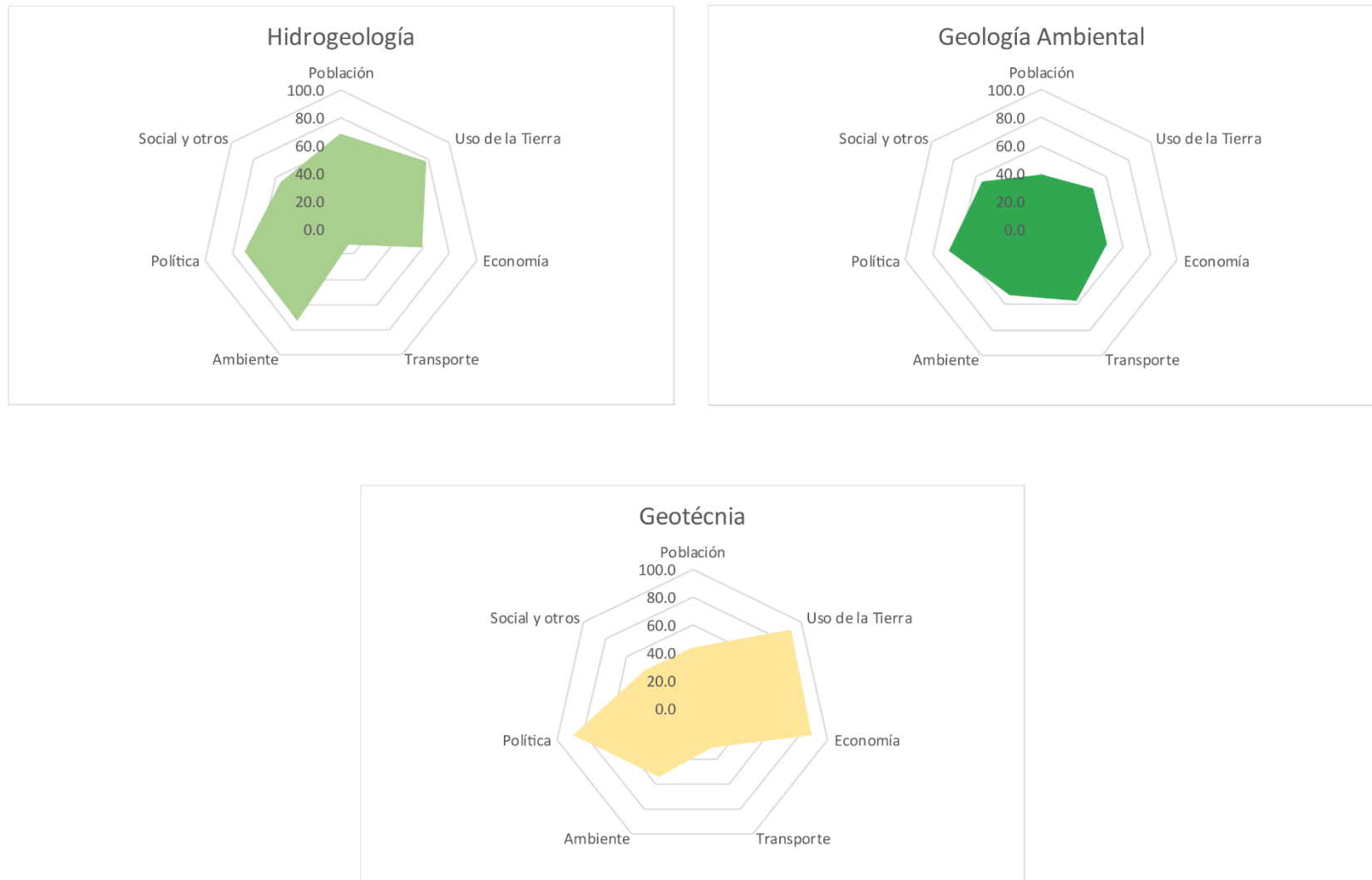
El análisis cruzado de los macro-indicadores ha arrojado siete categorías con incidencia o relación “Muy alta”. Sin embargo, sería interesante observar de manera

más general, cuales factores geológicos o geomorfológicos dictarán tendencias y tendrán un impacto mayor sobre los indicadores urbanos.

Para este fin se utilizarán los gráficos de áreas, pues proporcionan una visualización clara de todas las variables que están interviniendo, además de proveer indicios sobre cuáles serán los indicadores geológicos-geomorfológicos que enmarcarán en gran medida el proceso de desarrollo urbano de la sub-región del oriente antioqueño (Figura 50 a, b y c).



**Figura 50 a.** Gráficos de áreas donde se muestra que tanta influencia tiene un factor geológico-geomorfológico con los diferentes aspectos urbanos involucrados en el estudio.



**Figura 50 b.** Gráficos de áreas donde se muestra que tanta influencia tiene un factor geológico-geomorfológico con los diferentes aspectos urbanos involucrados en el estudio.



**Figura 50 c.** Gráficos de áreas donde se muestra que tanta influencia tiene un factor geológico-geomorfológico con los diferentes aspectos urbanos involucrados en el estudio.

Como puede apreciarse en los gráficos de áreas, los dos aspectos que más incidencia tendrán sobre la naturaleza urbana son: el Cambio climático y la Geomorfología. Por lo tanto, los planes de desarrollo urbano futuros enmarcados en una base conceptual geológico-urbana deben focalizarse fundamentalmente en la forma en como estos dos aspectos condicionarán en gran medida el proceso de expansión y crecimiento sostenible, buscando mantener una postura resiliente que se traduzca en un equilibrio entre el entorno antrópico y el entorno natural.

La geomorfología condicionará la distribución y el espacio disponible idóneo para llevar a cabo el desarrollo urbano palpable, dictaminado principalmente por las superficies de erosión y los escarpes. Mientras el cambio climático impactará una gran cantidad de frentes (economía, política, sociedad y ambiente), los cuales serán esenciales para asegurar la subsistencia económica de la región, así como la adaptación y futuro bienestar de la población.

Los otros aspectos que intervendrán en menor medida, pero de importancia considerable son: la Geotecnia y la Geología económica. El primero está altamente influenciado por el gran proceso urbanístico que está experimentando la región; mientras el segundo se enfoca primordialmente en el potencial económico de los materiales pétreos presentes en la zona, los cuales a su vez son una cadena de valor fundamental para llevar a cabo el proceso urbanístico mencionado anteriormente.

Finalmente es importante anotar que el sesgo o la falta de representación de ciertos indicadores puede deberse a la inexistencia de ciertos datos fundamentales (principalmente en la geomedicina) y al hecho como se condujo el estudio, donde no se llevó a cabo por un grupo multidisciplinario, sino por una sola persona por efectos demostrativos.



## **8. Discusión y recomendaciones posteriores**

A lo largo del escrito se ha expuesto de una manera sistemática la evolución del concepto de la geología urbana. Iniciando de manera empírica, hasta llegar al siglo XX, donde la falta de una definición precisa de la disciplina ha suscitado la proliferación de estudios, que no parecen compartir una base metodología estandarizada.

Con el proceso recopilatorio e investigativo, se ha propuesto una definición propia para la geología urbana, donde se delimitan claramente los alcances y preocupaciones que debe conjugar esta disciplina asociada a la geología ambiental.

Paralelamente, con la realización de este escrito ha surgido una especie de hipótesis que se ha ido materializando conforme se ha profundizado en el tema. Por lo que se ha suscitado una premisa que lleva a cuestionar si ciertas características particulares de la geología o la geomorfología pueden influenciar a tal punto una ciudad, que le imprimen una identidad única.

El repaso histórico de ciertas ciudades antiguas y la configuración especial de muchas ciudades modernas han dado pie para indagar si las ciudades, entidades únicas en muchos aspectos, toman parte de su imagen, presencia o dinámicas por efectos que se desprenden de los factores geológicos y geomorfológicos sobre los que se encuentran.

Las ciudades adoptan características o particularidades especiales, en su afán de adaptarse de la mejor forma a las condiciones iniciales impuestas por el entorno. Intentan mimetizarse con el ambiente, como organismos vivos que buscan subsistir con el menor gasto energético posible, adaptando fenómenos constitutivos que llevan a consignar una identidad propia claramente identificable y palpable en muchos casos. Manhattan tiene poco espacio habitable, pero posee un substrato magnifico para soportar grandes cargas; ¿Cómo acoge estas características? Sobreponer el problema de espacio edificando grandes edificios los cuales son fácilmente erigidos gracias a las cualidades físicas de su roca substrato. Medellín es una ciudad roja, pues gran cantidad de los materiales que constituyen sus edificios han sido elaborados con las arcillas y materiales similares de las áreas

circundantes, las cuales tienden a presentar una coloración rojiza. Igualmente, Medellín, en la zona del Poblado, el sustrato más adecuado para construir se encuentra en promedio a 20 m de profundidad. ¿Cómo salvar esta barrera impuesta por el entorno para llevar a cabo su proceso de expansión, sin poner en riesgo económico la gran cantidad de proyectos que se desarrollan en la zona? Simple, nuevamente la conjunción de un factor geológico y geomorfológico dictan las reglas: se deben construir edificios de gran elevación, con gran cantidad de apartamentos para que los costos inducidos por las cimentaciones, las cuales son complejas y deben llegar hasta el sustrato adecuado, sean salvados y amortiguados haciendo de esta forma viable el proyecto. Este fenómeno, de grandes edificios localizados espacialmente en una zona específica, da una imagen específica al barrio el Poblado, y gran parte de la ciudad de Medellín. “Personalidad”, si así puede llamarse, que viene influenciada directamente de la configuración geológica particular en la que se asienta la ciudad (Fig. 51). En consecuencia, la gran cantidad de habitantes con altos recursos que habitan en esta zona, proveen una gran cantidad de vehículos automotores que colapsan el tráfico, por el factor geomorfológico dominante ejemplificado por un valle relativamente estrecho con vertientes variables que limitan el área urbanizable. En consecuencia, puede argumentarse que el problema de movilidad en ciertas zonas de Medellín está parcialmente dado por su configuración geológica que obliga a construir grandes edificios, y su disposición geomorfológica que provee poco espacio.



**Figura 51.** Panorámica del barrio el Poblado en la vertiente oriental del Valle de Aburrá.

Y puede continuarse así con ejemplos de toda índole alrededor del mundo y a lo largo del tiempo: La civilización egipcia sacó gran provecho de la llanura de inundación del río Nilo para llevar a cabo su desarrollo, y de la gran cantidad de rocas presentes en la rívera, las cuales utilizaron para edificar el componente físico de su imperio. Los Nabateos se concentraron en un solo cuerpo rocoso de arenisca, entre los muchos otros estratos de la misma naturaleza en las vastas extensiones del desierto de Jordania; quizás porque esa arenisca que seleccionaron era la más adecuada para materializar sus construcciones in situ. Una solución inteligente, que además proveía una adecuada protección contra las dispares temperaturas del desierto. Las grandes ciudades norteamericanas deben su expansión territorial en gran medida a la uniforme geomorfología existente, pues esta no representa en muchos casos una barrera natural difícil de sortear por su naturaleza suave, que se extiende a lo largo y ancho de vastas llanuras.

Es por estas razones y muchas otras más expuestas a lo largo del escrito, que se invita a los grupos multidisciplinarios que acojan la metodología propuesta en este trabajo, a buscar si su ciudad posee características únicas que se configuraron por una situación particular; y si esta configuración diferenciable proviene en gran

medida de los cuerpos geológicos y las geoformas características sobre las que descansa.

Igualmente se invita a los especialistas en temas geológicos y urbanos a que den significado a la definición aquí expuesta de la geología urbana, mediante la ejecución de investigaciones alrededor el mundo, partiendo siempre de una uniformidad metodológica.

Las metodologías expuestas en este estudio representan solo las bases sobre las que se debe edificar un estudio geológico urbano. El futuro de la disciplina debe apuntar a la concepción de un mapa geológico urbano estandarizado, donde se representen claramente las relaciones aquí expuestas a través de los I. G. U. De esta forma, la antes confusa y dispar disciplina, muchas veces mal interpretada y relegada a segundas instancias, adquirirá un carácter significativo, y se transformará en una herramienta fundamental en los trabajos de planificación y desarrollo.

En cuanto al caso de estudio presentado en el Oriente antioqueño, la aplicación de la metodología de los I. G. U. como base para identificar lineamientos que deben tenerse en cuenta para un futuro desarrollo urbano planificado sobre bases teóricas que contemplen las particularidades geológicas y geomorfológicas de la región, han arrojado siete frentes o aspectos puntuales a tenerse en cuenta, los cuales son ejemplificados por cruces en la matriz, donde la incidencia de un factor geológico sobre la naturaleza urbana tiene una alta correlación, de manera que puede volverse prioritaria, pues condicionará en mayor o menor medida el proceso de crecimiento y desarrollo de la futura urbe.

Igualmente, del estudio de los I. G. U. y la matriz cruzada, soportándose en los gráficos de áreas, se determina que dos aspectos fundamentales influirán principalmente sobre los factores urbanos futuros de la sub-región: El cambio climático y la geomorfología presente. El primer aspecto impactará fundamental a la población y la base económica; mientras el segundo dictaminará en gran proporción la forma de distribución y organización que tomará el entramado urbano en el futuro.

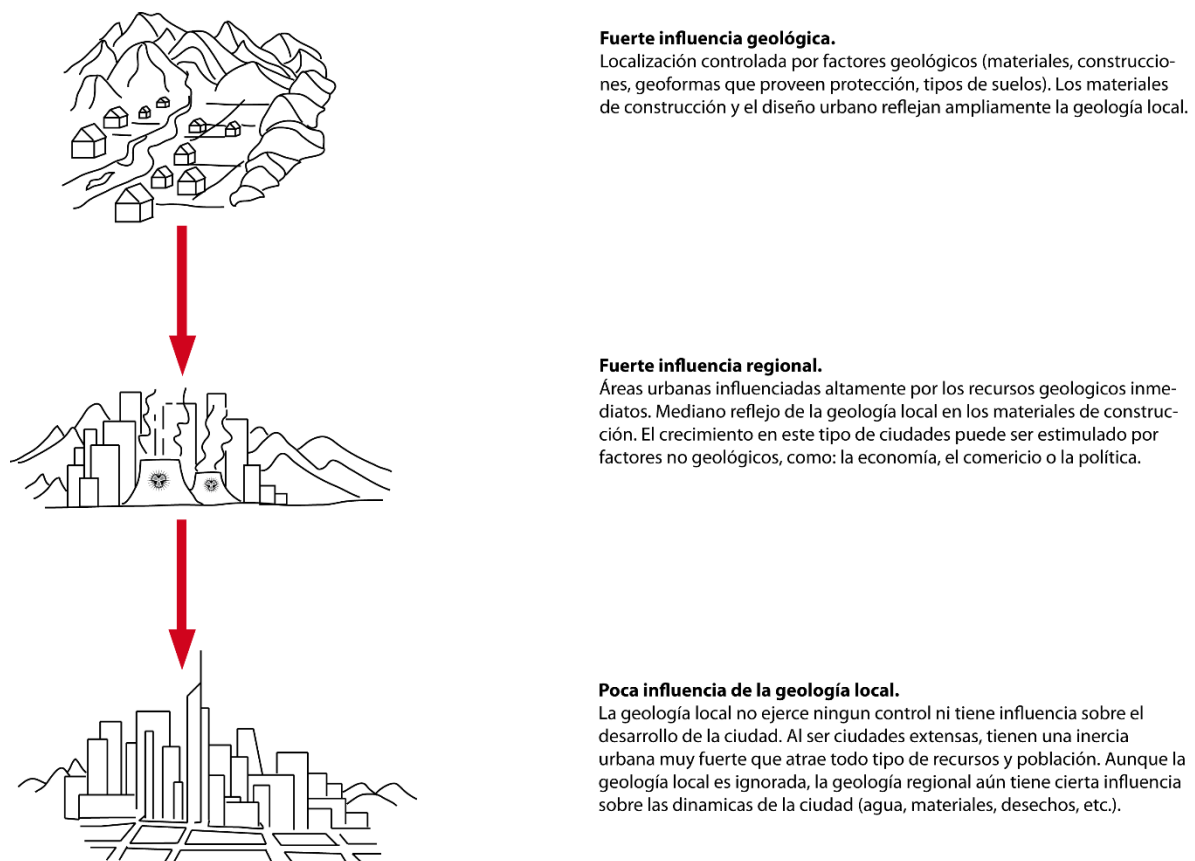
De este apartado, es interesante hacer mención también de ciertos indicadores que parecen no tener una alta incidencia en el futuro desarrollo urbano, principalmente del indicador geomedicina. La ausencia de este indicador dentro del estudio piloto ejemplificado puede deberse esencialmente a la falta de información y estudios de esta disciplina en nuestro ámbito regional. Sin embargo, no por esta razón debe menospreciarse y restarle importancia como un potencial factor que condicione el desarrollo urbano. En la subregión sería recomendable conducir estudios relacionados a la presencia de ciertas sustancias o gases nocivos para la salud derivados de cuerpos intrusivos y como estos se ven impactados o son afectados por el proceso de meteorización química preponderante en los trópicos.

De manera más general, es recomendable también exhortar a los investigadores en las ciencias de la tierra a conjugar los I. G. U. con el concepto de patrimonio geológico. De esta forma se pueden destinar, dentro del proceso de expansión y desarrollo, ciertas zonas de protección y reserva que ejemplifiquen o remarquen lugares de interés geológico (LIG) con un valor académico y educativo a la población, acercando de esta forma el conocimiento geológico al ciudadano común. Esta aproximación de los indicadores propuestos y el concepto de patrimonio a través de los LIG presenta razones prometedoras para ser trabajadas como herramientas complementarias, dada la naturaleza y el esquema conceptual de valoraciones cualitativas tan similar sobre el que operan.

Finalmente, es necesario plantear que actualmente nos debatimos en una especie de paradigma, el cual dicta que mientras más compleja se torne la configuración urbana, más influencia se pierde por parte del ambiente natural. Esta interesante idea fue expuesta por Bennett y Doyle en 1997 (Fig. 52).

Según los autores, un centro urbano incipiente tiene una fuerte influencia por parte de la geología local, pero dicha influencia desaparece gradualmente con el tiempo y el “avance” técnico que presenta la ciudad. Esto puede parecer una simple ilusión, puesto que la naturaleza geológica, aunque camuflada, sigue presente, y si no se reconoce y se interioriza adecuadamente crea conflictos que pueden turbar el desarrollo urbano.

Por lo tanto, se debe cambiar el paradigma de que la influencia (o importancia) geológica disminuye y pasa a un segundo plano con el tiempo. El aspecto geológico debe tenerse en cuenta para llevar a cabo un desarrollo resiliente de la ciudad, y es a esta simple premisa que debe apuntar la geología urbana, de forma que promueva un desarrollo más consciente que tenga en cuenta las variables del entorno que se “desprecian” conforme avanza el “desarrollo”.



**Figura 52.** Modelo del rol que desempeña la geología en el desarrollo urbano (Modificado de Bennett y Doyle, 1997).

## **9. Conclusiones**

### **9.1 Conclusiones referentes al Capítulo 5: El concepto de geología urbana a través del tiempo**

- A lo largo de la historia, el concepto de geología urbana se ha implementado de manera empírica. Se han llevado a cabo desarrollos urbanísticos mediante la potencialización de una característica geológica o geomorfológica puntal, la cual cumple una finalidad establecida derivada propiamente de estas características mencionadas.
- Desarrollos urbanos antiguos como Petra y Capadocia se han llevado a cabo sobre una sola unidad estratigráfica, la cual fue seleccionada por que cumplía con unas características físicas particulares, las cuales se ajustaban a las necesidades constructivas de los antiguos pobladores de estas regiones.
- Generalmente estas construcciones antiguas se realizaban mediante el proceso de excavación dentro de la roca, y no practicaban el proceso de extracción y transformación de materiales derivados de los mismos cuerpos geológicos. El proceso de extracción era posible, pues las rocas sobre las que lo practicaban presentaban las condiciones físicas y mecánicas adecuadas para llevar a cabo esta técnica.
- La mayoría de desarrollos urbanísticos excavados alrededor del mundo se localiza sobre cuerpos de naturaleza sedimentaria o volcano-sedimentaria, principalmente areniscas y calizas. Lo que sugiere una idoneidad de estos materiales para llevar a cabo desarrollos urbanos de este tipo.
- La selección de la ubicación de las polis griegas parece obedecer a la presencia de materiales constructivos, especialmente la presencia de calizas y dolomitas derivados de paisajes cársticos.
- El desarrollo del antiguo Egipto en la rivera del Nilo esta soportado por la presencia de más de 10 diferentes cuerpos geológicos de donde se extraían materiales a través de canteras, los cuales eran utilizados para llevar a cabo la construcción de monumentos y edificaciones.
- El rio Nilo facilito el transporte de dichos materiales y acortó el tiempo de viaje entre las canteras y el lugar constructivo.



- Las llanuras de inundación del Nilo, además de proveer los factores ambientales ideales para el desarrollo de la sociedad egipcia, proporcionaron materias primas esenciales que fueron utilizadas como aglutinantes y agregados en el proceso constructivo.
- El imperio romano basó su proceso constructivo y de expansión en la utilización de los materiales geológicos presentes en la región, caracterizado por las calizas y rocas volcánicas, las cuales no solo utilizaron como elementos constructivos, sino que las transformaron y mejoraron mediante la creación de morteros.
- Los materiales geológicos escogidos para conformar los caminos romanos obedecen a un entendimiento conceptual de las características físicas de los mismos, pues cumplían con los requisitos físicos necesarios para conformar obras de gran extensión con la capacidad de perdurar en el tiempo.
- Puede considerarse que la expansión y éxito del imperio romano debe una parte al gran conocimiento que tenían los romanos de su entorno natural. El cual supieron explotar y potencializar para llevar a cabo las acciones desarrollistas que consideraban necesarias.
- Las ciudades antiguas no solo explotaron una característica geológica para imprimir un carácter o una finalidad definidas para sus urbes. También se apoyaron en rasgos geomorfológicos, los cuales podían proporcionar factores de protección, comunicación o acceso a servicios básicos como el agua.
- Ciudades como Venecia o Tenochtitlan en México, basaron gran parte de su desarrollo alrededor del recurso agua, el cual proveía protección y bienestar a sus pobladores.
- El desconocimiento o el desarrollo poco resiliente de estos dos casos frente al recurso que las sostiene, el agua, ha originado una serie de problemas que han puesto en riesgo la subsistencia, para el caso de Venecia, o acarrear problemas geotécnicos modernos y la escasez del recurso, para el caso de la ciudad de México, heredera geográfica, política y social de Tenochtitlan en el México moderno.

- La amenaza de desaparecer por un aumento del nivel del mar en la ciudad de Venecia esta dictaminado por la conjugación de dos factores: uno local y otro a nivel planetario. El primero obedece al delicado equilibrio que presenta el ambiente geológico de lagoon donde se desarrolló la ciudad; el segundo está altamente relacionado con el cambio climático global que experimenta el planeta actualmente.
- Los problemas actuales en materia de licuefacción y hundimientos que presenta la ciudad de México, se deben a un desconocimiento de los españoles los cuales destruyeron y modificaron el antiguo estado hidráulico de la ciudad de Tenochtitlan sobre el lago Texcoco, por considerarlo retrogrado y poco higiénico.
- Ciudades modernas como Nueva York han acogido y potencializado la suma de un factor geológico y otro geomorfológico para llevar a cabo su desarrollo. En este caso, la icónica y reconocible configuración urbana de Manhattan se debe al poco espacio disponible en la zona y a la presencia somera de un substrato rocoso adecuado (Gneiss), con la capacidad de soportar grandes cargas estructurales.

## **9.2 Conclusiones referentes al Capítulo 6: Geología urbana, una aproximación moderna**

- El origen del concepto moderno de geología urbana puede trazarse hasta el comienzo del siglo XX. Su evolución, así como su definición y delimitación se ha diluido y malinterpretado a lo largo del siglo pasado. Lo que lo ha llevado a que se categorice como una disciplina secundaria de la geología ambiental asociada a la atención y prevención de desastres (especialmente en regiones como Latinoamérica).
- Se debe desligar el concepto de la geología urbana de esto último, y entenderlo como algo más expansivo, más incluyente y universal, que entiende a la ciudad como un ente de gran complejidad que demanda y desecha grandes cantidades de recursos. Debe estar enfocada a la planeación y manejo sostenible del entorno urbano en equilibrio con el espacio físico que ocupa y rodea.

### **9.3 Conclusiones referentes al Capítulo 7: El concepto unificado de geología urbana**

- La geología urbana debe definirse como una rama del conocimiento entrelazada y desarrollada a la par de la geología ambiental. La cual se ocupa de estudiar como los procesos urbanos y las dinámicas humanas se correlacionan con los aspectos geológicos y geomorfológicos sobre los que evolucionan y actúan directamente.
- La geología urbana debe abarcar y considerar los aspectos urbanos, humanos, sociales, económicos, ambientales y políticos. Buscando conjugar dichas temáticas sobre una misma línea de desarrollo, que potencialice y aproveche los aspectos geológicos y geomorfológicos de la manera más adecuada, preservando en mayor medida, las características naturales y mitigando los posibles riesgos que puedan surgir como consecuencia de un mal entendimiento de los fenómenos descritos previamente.
- Igualmente, la geología urbana debe explorar las características particulares que dan identidad a una ciudad, derivadas propiamente de los fenómenos geológicos y superficiales sobre los que se asienta.
- La base teórica de la geología urbana es el estudio geológico-urbano, el cual debe estar enfocado en visualizar y analizar todas las dinámicas, tanto naturales como urbanas que intervienen en la configuración y desarrollo de una ciudad.
- La base metodológica del estudio geológico-urbano son los indicadores geológico-urbanos – I. G. U.
- El concepto de I. G. U. propuesto pretende abarcar más allá de los aspectos ambientales y propone relacionar, mediante una matriz cruzada, la importancia e incidencia que tienen los aspectos geológicos y geomorfológicos en todos los aspectos urbanos conocidos, a través de una guía metodológica jerarquizada por la escala de cada uno de estos aspectos.
- El análisis de los I. G. U. mediante una matriz cruzada evidencia de forma práctica la dualidad geológico-urbana. Se realiza mediante una calificación cualitativa asignada por un grupo multidisciplinario, utilizando una escala de

0 a 4 (Siendo 0 una relación nula y 4 una muy alta relación) para identificar que tanta relación o incidencia hay por parte de los componentes geológicos/geomorfológicos sobre los aspectos urbanos.

- Los indicadores geológico-geomorfológicos encausan el análisis desde escalas macro, de orden global o continental, hasta escalas micro, más detalladas, que se ocupan de aspectos locales y puntuales.
- El análisis de la matriz cruzada puede ser llevado a cabo en el tiempo presente, para estudiar la situación actual que compromete al caso en cuestión y establecer una línea base. Igualmente, dada la naturaleza de los indicadores (tanto geológicos como urbanos), el análisis cruzado puede efectuarse para un evento pasado, el cual servirá como parámetro para medir la evolución del entorno; o establecerse en escenario futuro hipotético, con lo cual, el estudio tomará un carácter predictivo y servirá como una medida de planificación a largo plazo.
- Los I. G. U. no representan directrices rígidas y por el contrario, el contenido de la matriz puede ser variado o modificado según el interés profesional o propio del estudio en ejecución.
- Dada la dualidad conceptual de la geología urbana, es imperativo conducir el estudio geológico-urbano bajo una mirada multidisciplinaria, donde intervengan profesionales de ciencias de la tierra, urbanistas, arquitectos, planificadores, ingenieros, políticos y dirigentes por igual, que impriman un carácter más universal que intente recopilar, en todos sus aspectos, las complicadas interacciones que ocurren dentro de una ciudad.
- Dada la gran cantidad de cruces que surgen de la matriz cruzada, es más práctico agrupar los cruces por macro-indicadores para facilitar el análisis y observar tendencias macro de los aspectos geológicos/geomorfológicos sobre los aspectos urbanos.
- Estos macro-indicadores pueden ser representados de manera visual a través de la elaboración de gráficos de áreas. Lo que permite determinar rápidamente, de acuerdo al aérea o tamaño que alcanza el polígono, que

tanta importancia tiene un aspecto geológico-geomorfológico en relación con las variables urbanas escogidas.

- La significancia de los resultados arrojados por la matriz y la incidencia observada a través de los gráficos de áreas radica en el proceso de calificación y la calidad y disponibilidad de la información, así como del grupo de especialista que conforman el equipo multidisciplinario.
- Para el caso de estudio seleccionado en la subregión del oriente antioqueño cercano. El análisis de los I. G. U. arrojó siete macro-indicadores con una relación “Muy alta” mostrando un nivel de significancia importante entre dos variables que deberán ser tenidas en cuenta en los futuros planes de desarrollo urbanos.
- Los dos aspectos que más incidencia tendrán sobre la naturaleza urbana en el caso de estudio son: el Cambio climático y la Geomorfología.
- La geomorfología condicionará la distribución y el espacio disponible idóneo para llevar a cabo el desarrollo urbano palpable, dictaminado principalmente por las superficies de erosión y los escarpes.
- El cambio climático impactará una gran cantidad de frentes de desarrollo, los cuales serán esenciales para asegurar la subsistencia económica de la región, así como la adaptación y futuro bienestar de la población.
- Otros aspectos que intervendrán en menor medida, pero de importancia considerable en el futuro desarrollo urbano de la subregión son: la Geotecnia y la Geología económica. El primero está altamente influenciado por el gran proceso urbanístico que está experimentando la región; mientras el segundo se enfoca primordialmente en el potencial económico de los materiales pétreos presentes en la zona.
- La falta de representación de ciertos indicadores puede deberse a la inexistencia de ciertos datos fundamentales que soporten o clarifiquen el vacío conceptual que actualmente se tiene en la zona en materia de investigaciones puntuales.
- Actualmente se convive con una especie de paradigma, el cual dicta que mientras más compleja se torne la configuración urbana, más influencia se

pierde por parte del ambiente natural. Se debe modificar este concepto y resaltar el aspecto geológico dentro de los estudios urbanos para llevar a cabo un desarrollo resiliente de la ciudad. Es a esta simple premisa que debe apuntar la geología urbana.

## 10. Bibliografía

- **Abed, A. K., Al-Katib, A., Allan, A., Al-Barghouti, S. y Allah, T. Q.**, 2012. On the Origin and Evolution of the Petra siq from Geological Perspective, is it Natural or Man-made? *Jordan Journal for History and Archaeology*, Vol. VI, No. 2. Pags. 215 – 232.
- **Aguilera, P.**, 2013. Catedral Metropolitana – Hundimiento y Rescate. México, Instituto de Ingeniería UNAM. 64 p.
- **Álvarez, Víctor Andrés**, *Venta de vivienda en el Oriente de Antioquia creció un 500 % en 7 años*. En: **El Colombiano**, Medellín. 7, Julio, 2016. Pag. 11.
- **Ami, H. M.**, 1900. On the Geology of the Principal Cities in Easter Canada. En: **Bathrellos, G. D.**, 2007. An Overview in Urban Geology and Urban Geomorphology. Bulletin of the Geological Society of Greece, Vol. XXXX. Pags. 1354 – 1364.
- **Ahnert, F.**, 1998. Introduction to Geomorphology. Nueva York, Arnold. 352 p.
- **Appleton, J. D.**, 2005. Radon in Air and Water. En: **Keller, E. A.**, 2011. Environmental Geology. Nueva York, Prentice Hall. 596 p.
- **Ayhan, A.**, 2004. Geological and Morphological Investigations of the Underground Cities of Cappadocia Using GIS. Master of science degree thesis. School of Natural and Applied Sciences. Middle East Technical University. 120 p.
- **Barr, J. y Tassier, T.**, 2009. Bedrock Depth and the Formation of the Manhattan Skyline, 1890-1915. Rutgers University, Newark Working Paper, 2009-006. 38 p.
- **Bathrellos, G. D.**, 2007. An Overview in Urban Geology and Urban Geomorphology. Bulletin of the Geological Society of Greece, Vol. XXXX. Pags. 1354 – 1364.
- **Bayrak, D.**, 1999. Deprem ve Plaka Tektoniği. Mavi Gezegen, sayı 1, s.10-15, TMMOB, Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları. En: **Ayhan, A.**, 2004. Geological and Morphological Investigations of the Underground Cities of

Cappadocia Using GIS. Master of Science degree thesis. School of natural and applied sciences. Middle East Technical University. 120 p.

- **Bennett, M. R. y Doyle, P.**, 1997. Environmental Geology. Geology and the Human Environment. New York, John Wiley and Sons Limited. 501 p.
- **Brambati, A., Carbognin, L., Quaia, T., Teatini, P. y Tosi, L.**, 2003. The Lagoon of Venice: Geological Setting, Evolution and Land Subsidence. Episodes, Vol. 26, No. 3. Pags. 264 – 268.
- **California Division of Mines and Geology**, 1973. Urban Geology: Master Plan for California. California Agencies, Paper 256. 113 p.
- **Crouch, D. P.**, 1996. Environmental Geology of Ancient Greek Cities. Environmental Geology, 27. Pags. 233 – 245.
- **De Mulder, E. F. J., van Bruchem, A. J., Claessen, F. A. M., Hannink, G., Hulsbergen, J.G. y Satijn, H.M.C.**, 1994. Environmental Impact Assessment on Land Reclamation Projects in The Netherlands: A Case History. Engineering Geology, Vol. 37, Issue 1. Pags 15 – 23.
- **De Mulder, E. F. J.**, 1996. Urban Geoscience. *En: Bathrellos, G. D.*, 2007. An Overview in Urban Geology and Urban Geomorphology. Bulletin of the Geological Society of Greece, Vol. XXXX. Pags. 1354 – 1364.
- **Douglas, I.**, 1988. Urban Planning Policies for Physical Constraints and Environmental Change. *En: Bathrellos, G. D.*, 2007. An Overview in Urban Geology and Urban Geomorphology. Bulletin of the Geological Society of Greece, Vol. XXXX. Pags. 1354 – 1364.
- **Douglas, I.**, 1990. Sediment Transfer and Siltation. *En: Turner, B. L., Clark, W. C., Kates, R. W., Richards, J. F., Mathews, J.T. y Meyer, E. B.* (Editores), 1990. The Earth as Transformed by Human Action. New York, Cambridge University Press. Pags. 215 – 234.
- **Dumon, F. C.**, 2010. The Cambro-Ordovician Sequence in the Petra Area, Jordan – sedimentology and stratigraphy. MSc Thesis. TA Report number: AES/TG/10-38. Section for **applied** geology. Department of Applied Earth Science. Delf University of Tecnology.



- **El Retiro. Alcalde Municipal. Acuerdo 014** (2013). Por Medio del Cual se Adopta la Revisión y Ajuste del Plan Básico de Ordenamiento Territorial del Municipio de El Retiro – Antioquia. El Retiro, 2013. 116 p.
- **Fisher, D. W., Isachsen, Y. W. y Ricard, L. V.**, 1970. Geologic map of New York State. New York State Museum and Science Service. Map and chart series No. 15, scale 1:25.000.
- **Gallego, J. J.**, 2011. Análisis Geomorfológico como Apoyo a la Búsqueda de Actividad Neotectónica en el Oriente Antioqueño (Oriente Cercano a la Ciudad de Medellín). *En: Rendón, A. de J., Caballero, J. H., Arias, A., González, A., Arenas, J. A. y Gallego, J. J.*, 2011. Estudio Geológico-geomorfológico en el Oriente Cercano a Medellín, como Apoyo a la Búsqueda de Actividad Tectónica Reciente. Boletín de Ciencias de la Tierra, N. 29. Pags. 39 – 54.
- **Githeko, A. K., Lindsay, S. W., Confalonieri, U. E. y Patz, J. A.**, 2010. El Cambio Climático y las Enfermedades Transmitidas por Vectores: Un Análisis Regional. Revista Virtual REDESMA, Vol. 3 (3). Pags. 22 – 38.
- **González, J. L.**, 2009. Condominios y Estabilidad Ecológica en los Andes Centrales Colombianos. Revista Luna Azul. No. 29. Pags. 54 – 67.
- **Guarne. Concejo Municipal de Guarne. Acuerdo 003** (6 de Mayo de 2015). Por Medio del Cual se Adopta la Revisión y Ajuste del Plan Básico de Ordenamiento Territorial del Municipio de Guarne – Antioquia. Guarne, 2015. 355 p.
- **Gülyaz, M. E.**, 2012. Göreme National Park and the Rock Sites of Capadoccia. Ankara, Ministry of Culture and Tourism Publications. 168 p.
- **Gupta, A.**, 2002. Geoindicators for Tropical Urbanization. Environmental Geology, 42. Pags. 736 – 742.
- **Hageman, B. P.**, 1963. A New Method of Representation in Mapping Alluvial Areas. Verh. Kon. Ned. Geol. Minjb. Gen. Geology, 21 – 2. Pags. 211 – 219.
- **Harrel, J. A. y Storemyr, P.**, 2009. Ancient Egyptian Quarries - An Illustrated Overview. *En: Abu-Jaber, N., Bloxam, E.G., Degryse, P. y Heldal, T.*

- (Editores), *QuarryScapes: Ancient Stone Quarry Landscapes in the Eastern Mediterranean*, Geological Survey of Norway Special Publication, 12. Pags. 7 – 50.
- **Hermelin, M.** (Editor), 2007. *Entorno Natural de 17 Ciudades de Colombia*. Medellín, Fondo Editorial Eafit. 344 p.
  - **Hermelin, M., Echeverri, A. y Giraldo, J.** (Editores), 2010. *Medellín: Medio Ambiente, Urbanismo y Sociedad*. Medellín, Fondo Editorial Eafit. 367 p.
  - **Jackson, M. D., Marra, F., Hay, R. L., Cawood, C. y Winkler, E. M.**, 2005. The Judicious Selection and Preservation of Tuff and Travertine Building Stone in Ancient Rome. *Archaeometry* 47, 3. Pags. 485 – 510.
  - **Kamel Boulos, M. N. y Le Blond, J.**, 2016. On the Road to Personalised and Precision Geomedicine: Medical Geology and a Renewed Call for Interdisciplinarity. *International Journal of Health Geographics*, 15: 5. 12 p.
  - **Kasper, D. L., Fauci, A. S., Hauser, S. L., Longo, D. L., Jameson, J. L. y Loscalzo, J.** (Editores), 2015. *Harrison's Principles of Internal Medicine*. 19th Edition, Vol. 2. McGraw-Hill Education. 2769 p.
  - **Keller, E. A.**, 2011. *Environmental Geology*. Nueva York, Prentice Hall. 596 p.
  - **Kent, V.D., Rio D., Massari, F., Kukla, G., y Lanci, L.**, 2002. Emergence of Venice during the Pleistocene. *Quaternary Science Review*, Vol. 21. Pags. 1719 – 1727.
  - **Klemm, D. D. y Klemm, R.**, 2001. The Bulding Stones of Ancient Egypt – A Gift of its Geology. *Journal of African Earth Science*, 33. Pags. 631 – 642.
  - **Legget, R. F.**, 1973. *Cities and Geology*. New York, McGraw-Hill Book Company. 624 p.
  - **Låg, J.**, 1972. Soil Sciene and Geomedicine. *Acta Agricultura Scandinavica*, No. 22. Pags. 150 – 152.
  - **Låg, J.** (Editor), 1980. *Geochemical Aspects in Present and Future Research*. Norwegian Academy of Science and Letters. Universitetsforlaget, Oslo. 226 p.
  - **Låg, J.**, 1990. *Geomedicine*. Boca Raton, Florida, CRC Press. 279 p.

- **Låg, J. y Bølviken, B.**, 1974. Some Naturally Heavy-metal Poisoned Areas of Interest in Prospecting, Soil Chemistry, and Geomedicine. *Norges Geol*, 304. Pags. 73 – 96.
- **Londoño, A.**, 2012. Cambios en el Uso del Suelo en el Altiplano (Oriente Antioqueño – Colombia) en los Últimos 25 Años. Trabajo de Grado de Maestría. Universidad Internacional de Andalucía. 61 p.
- **López, R.**, 2003. Relations Between Man and Environment in the Development of Precolonial Settlements in the Basin of México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, No. 50. Pags. 166 – 172.
- **López, L., Torres, J. y Montúfar, A.**, 2003. Los Materiales Constructivos del Templo Mayor de Tenochtitlan. *Sobretiro de Estudios de Cultura Náhuatl*, Vol. 34. 48 p.
- **Makhlouf, I. M y Abed, A. M.**, 1991. Depositional facies and environments in the Umm Ishrin Sandstone Formation, Dead Sea area, Jordan. *Sedimentary Geology*, Vol. 71, Issues 3 - 4. Pags. 177 – 187.
- **Merguerian, C.**, 1983. Tectonic significance of Cameron's line in the vicinity of the Hodge Complex – An imbricate thrust model for Western Connecticut. *American Journal of Science*, Vol. 283. Pags. 341 – 368.
- **Merguerian, C.**, 1996, Cameron's Line Mylonite Zone in Connecticut and New York City - Evidence for Taconian Accretionary Tectonics (abs.): *Geological Society of America Abstracts with Programs*, Vol. 28, No. 3. 81 p.
- **Merguerian, C. y Baskerville, C. A.**, 1987. The Geology of Manhattan Island and the Bronx, New York City, New York. *Centennial Fieldguide*. Pags: 137 – 140.
- **Merrill, F. J. H.**, 1898, The Geology of the Crystalline Rocks of Southeastern New York. *New York State Museum Annual Report*, 50, Vol. 1. Pags. 21 -31.
- **Musset, A.**, 1996 Mudarse o desaparecer. Traslado de ciudades hispanoamericanas y desastres. Siglos XVI-XVIII. *En: Sosa, F. S.*, 2010. Impacts of Water-management Decisions on the Survival of a City: From

Ancient Tenochtitlan to Modern Mexico City. *International Journal of Water Resources Development*, 26, 4. Pags. 675 – 687.

- **Nations, J. D., Hevly, R. H., Blinn, D. W., y Landye, J. J.**, 1981. Paleontology, Paleoecology, and Depositional History of the Miocene-Pliocene Verde Formation, Yavapai County, Arizona. *Arizona Geological Society Digest*, 13. Pags. 133-149.
- **Niemi, T.**, 2009. Paleoseismology and archaeoseismology of sites in Aqaba and Petra, Jordan. *Field Guide 1*. Department of Geosciences, University of Missouri - Kansas City. 7 p.
- **Ovando-Shelley, E., Ossa, A. y Romo, M. P.**, 2007. The Sinking of México City: Its Effects on Soil Properties and Seismic Response. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27. Pags. 333 – 343.
- **Pabón, J. D.**, 2003. El Cambio Climático Global y su Manifestación en Colombia. *Cuadernos de Geografía*, XII (1-2). Pags. 111 – 119.
- **Pollard, W. S. y Moore, D. W.**, 1969. *The State of the Art of Planning*. En: **Keller, E. A.**, 2011. *Environmental Geology*. Nueva York, Prentice Hall. 596 p.
- **Posada, V. V. y Sepúlveda, G. F.**, 2012. Extracción de Recursos Minerales en el Oriente Antioqueño: Sostenibilidad y Repercusión en el Medio Ambiente. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, N. 31. Pags. 97 – 106.
- **Rendón, A. de J., Caballero, J. H., Arias, A., González, A., Arenas, J. A. y Gallego, J. J.**, 2011. Estudio Geológico-geomorfológico en el Oriente Cercano a Medellín, como Apoyo a la Búsqueda de Actividad Tectónica Reciente. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, N. 29. Pags. 39 – 54.
- **Rionegro. Alcalde y Mesa Directiva del Consejo. Acuerdo 056** (25 de Enero de 2011). Por Medio del Cual se Adopta la Revisión y Ajuste del Plan de Ordenamiento Territorial para el Municipio de Rionegro. Rionegro, 2011. 355 p.
- **Rosenblueth, E., García, V., Rojas, T., Orozco, J. y Núñez, J.**, 1992. *Macrosismos. Aspectos Físicos, Sociales, Económicos y Políticos*. Ciudad de México. 27 p.

- **Rubonowitz-Lundin, E. y Hiscock, K. M.**, 2005. Water Hardness and Health Effects. *En: Selinus, O.* (Editor), 2005. Essentials of Medical Geology. Elsevier. Pags. 331 – 345.
- **Sarikaya, M. A., Çiner, A. y Zreda, M.**, 2015. Fairy Chimney Erosion Rates on Cappadocia Ignimbrites, Turkey: Insights from Cosmogenic Nuclides. *Geomorfology*, 234. Pags. 182 – 191.
- **Servicio Geológico Mexicano**, 2002. Carta Geológico-Minera. Ciudad de México E14-2. Edo. de Mex., Tlax., D. F., Pue., Hgo. y Mor. Escala 1:250.000.
- **Shaw, J.**, 2003. Who Build the Pyramids. *Harvard Magazine*, Julio – Agosto 2003. Pags. 42 – 49 y 99.
- **Sima Ajami, M. F.**, 2009. The Role of Earthquake Information Management Systems (EIMSS) in Reducing destruction: A comparative Study of Japan, Turkey and Iran. *Disaster Prevention and Management: An International Journal*. Vol. 18, No. 2. Pags. 150 – 161.
- **Singh, S., Vindoh Kumar, S. y Waghmare, S. A.**, 2015. Characterization of 6–11th Century A.D Decorative Lime Plasters of Rock Cut Caves of Ellora. *Construction and Building Materials*, 98. Pags. 156 – 170.
- **Sosa, F. S.**, 2010. Impacts of Water-management Decisions on the Survival of a City: From Ancient Tenochtitlan to Modern Mexico City. *International Journal of Water Resources Development*, 26, 4. Pags. 675 – 687.
- **Soto, L. y Pate, D.**, 2013. Cave and Karst Resources Summary. Montezuma Castle National Monument, Arizona. Geologic Features and Systems Branch - Geologic Resources Division. National Park Service – Natural Resources Stewardship and Science. 8 p.
- **Stea, T. y Turan, M.**, 1993. Placemaking: Production of Built Environment in Two Cultures. England, Avebury Ashgate Publishing Limited.
- **Tan, B. K.**, 1987a. Landslides and Hillside Development – Recent Case Studies in Kuala Lumpur, Malaysia. *En: Tan, B. K.*, 2006. Urban Geology of Kuala Lumpur and Ipoh, Malaysia. IAEG, paper number 24. 7 p.

- **Tan, B. K.**, 1987b. Geology and Urban Development of Kuala Lumpur, Malaysia. Proc. LANDPLAN III Symp., 15-20 Dec. 1986, Hong Kong. Geological Society of Hong Kong Bulletin No. 3, Pags. 127 -140.
- **Tan, B. K.**, 2006. Urban Geology of Kuala Lumpur and Ipoh, Malaysia. IAEG, paper number 24. 7 p.
- **Tortolero, A.**, 2000. El agua y su historia. Mexico City: Siglo XXI.
- **Trujillo Villa, Camilo**, *Área Metropolitana del Oriente Antioqueño se refrendará en Mayo de 2018*. En: **El Colombiano**, Medellín. 17, Abril, 2017. Pag. 12.
- **UNESCO**, 1997. Geology for Sustainable Development. Bulletin 11. 153 p.
- **United Nations**, 2016. The World's Cities in 2016 Data Booklet. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. 29 p.
- **U. S. Environmental Protection Agency**, 1986. A Citizen's Guide to Radon. En: **Keller, E. A.**, 2011. Environmental Geology. Nueva York, Prentice Hall. 596 p.
- **Vázquez, E. y Jaimes, P.**, 1989. Geología de la Cuenca de México. Geofísica Internacional, Vol. 28, No. 2. Pags. 133 – 190.
- **Walton, M.**, 1982. Engineering Geology of the Twin Cities Area. Geol. Soc. of America, N. 5. Pags. 125 – 131.
- **Wetzel, M.J., Oberlin, G.E. y Blinn, W.**, 1999. The Aquatic Oligochaeta (Annelida: Clitellata) of Montezuma Well, Arizona: A near Thermally Constant Limnocrone. The Southwestern Naturalist, Vol. 44, No.4. Pags. 514-518.
- **World Bank**, 2012. What a Waste: A Global Review of Solid Waste Management. Urban Development Series Knowledge Series, Marzo 2012, No. 15. 98 p.
- **World Bank**, 2016. Preparedness Map for Community Resilience: Earthquakes. Experience of Japan. Washington, International Bank for Reconstruction and Development. 40 p.
- **Zapata, D., Barrera, M., Gómez, R. y Naranjo, L.** (Editores), 2017. Plan de Crecimiento Verde y Desarrollo Compatible con el Clima en el Oriente

Antioqueño. Alianza Clima y Desarrollo, Corporación Autónoma Regional de las cuencas de los ríos Negro y Nare, Fundación Natura, WWF. 176 p.

- **Zeza, F.**, 2014. Venezia Città d'acque. Le Incidenze Geologiche su Origini, Evoluzione e Vulnerabilità, Venezia, Marsilio Editori. 168 p.

## 10.1 Recursos electrónicos (en orden de citación) y Software

- <http://www.nationalgeographic.com/archaeology-and-history/archaeology/lost-city-petra/> [24.05.2016].
- [https://www.nps.gov/moca/planyourvisit/upload/Verde-Valley-Geology\\_2007.pdf](https://www.nps.gov/moca/planyourvisit/upload/Verde-Valley-Geology_2007.pdf) [13.10.2016].
- <https://ngmdb.usgs.gov/Geolex/search> [14.10.2016].
- [http://www.arizonaruins.com/montezuma\\_castle/montezuma\\_castle.html](http://www.arizonaruins.com/montezuma_castle/montezuma_castle.html) [22.09.2016].
- <http://blogs.scientificamerican.com/rosetta-stones/visiting-a-desert-karst-oasis-the-magic-of-montezuma-well/> [22.09.2016].
- <http://www.fom.sg/Passage/2012/07ajanta.pdf> [19.01.2017].
- <http://aspasiatravel.es> [19.01.2017].
- [https://www.wmf.org/sites/default/files/article/pdfs/pg\\_38-45\\_bandiagara.pdf](https://www.wmf.org/sites/default/files/article/pdfs/pg_38-45_bandiagara.pdf) [19.01.2017].
- <http://wserv4.esc.cam.ac.uk/escfieldwork/?p=282> [30.05.2017].
- <http://www.heritagedaily.com/2014/07/10-must-see-temples-in-greece/104070> [30.05.2017].
- <http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2010/04/22/135942> [28.05.2017].
- <http://recursos.bibliotecanacional.gov.co/content/geograf%C3%AD-y-cartograf%C3%AD-imperios-censura-y-rivalidad> [21.12.2016].
- <https://www.quora.com/Why-is-Manhattans-distribution-of-skyscrapers-so-uneven> [31.05.2017].
- <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map/> [03.01.2017].
- <http://droughtmonitor.unl.edu/> [03.01.2017].
- <http://earthmagazine.org/article/urban-geology-emerging-discipline-increasingly-urbanized-world> [9.06.2017].
- <http://wordpress.mrreid.org/2011/12/28/radiation-in-the-uk/> [27.02.2017].
- Google Earth ©2017 Google.
- LithoFrame Viewer ©2006 – 2011 NERC.
- Global Mapper ©2017 Blue Marble Geographics.